INVESTIGACION y CIENCIA

ENERO 2000
800 PTA. 4,81 EURO

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

¿Se obtendrá la ley unificadora de la física?

¿Retrasaremos el proceso de envejecimiento?

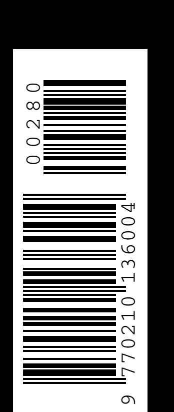
¿Qué es la conciencia?

¿Cómo surgió el universo?

¿Descubriremos los secretos escondidos de los genes?

¿Hay vida extraterrestre?

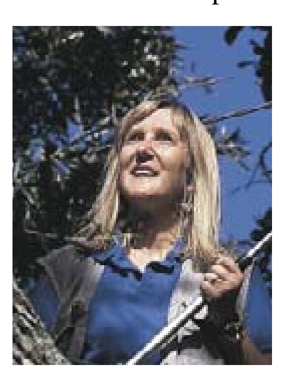
LA CIENCIA ASI QUE PASEN 50 AÑOS

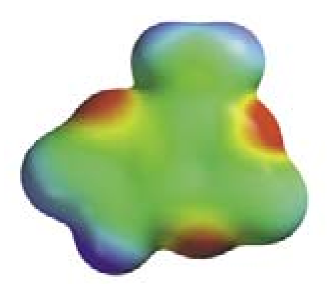


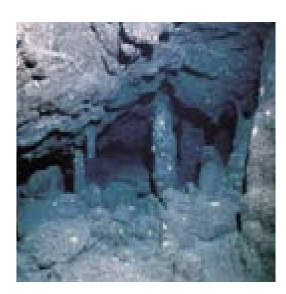


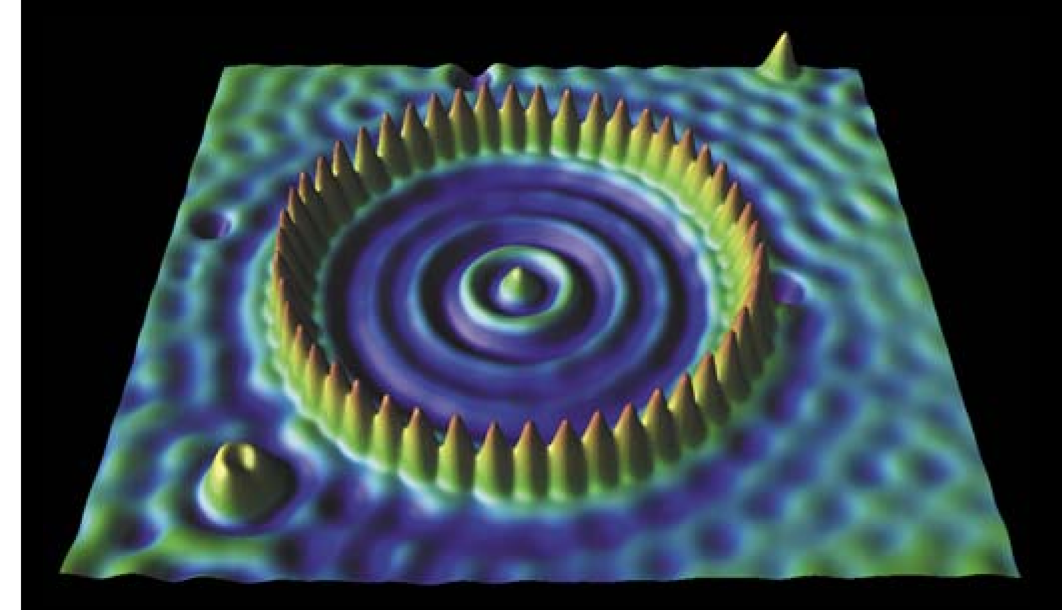
Número 280

LA CIENCIA ASI QUE









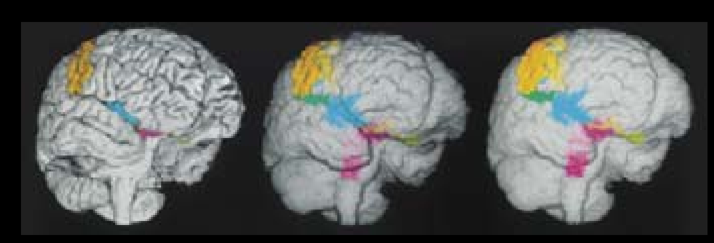


Enero de 2000

PASEN 50 AÑOS

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

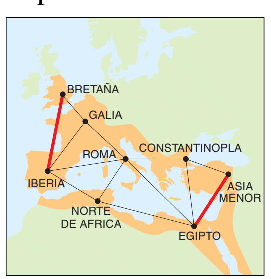


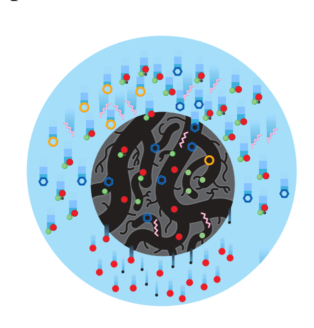




SECCIONES









Portada: Space Channel/ Philip Saunders

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
7-8	Centro Espacial Johnson, NASA
9	A. Barrington Brown
10	Centro de Investigación de Almaden, IBM
12	Cortesía de *Nature*
15	Alfred T. Kamajian
16-17	Johnny Johnson
18-19	Slim Films (*arriba, izquierda*); Johnny Johnson
20	Slim Films
23	Virgo Consortium (J.M. Colberg, H.M.P. Couchman, G. Efstathiou, C.S. Frenk, A. Jenkins, J.A. Peacock, F.R. Pearce y S.D.M. White
24-25	Alfred T. Kamajian
26	Pat Rawlings
43	Everard Williams, Jr.
44-45	Bryan Christie
46	Bryan Christie con la colaboración de John Logsdon
49	Thomas Wanstall
50	Sovfoto/Eastfoto
52	Frans Lanting
53	Catherine Marin
55	CORBIS/AFP
56	Robert Pickett, David Muench, Jim Zuckerman y Corbis (*izquierda, de arriba abajo*); Chinch Gryniewicz (*fotografía*), Laurie Grace (*gráfica*)
57	NOAA/Laboratorio de Fluidos Dinámicos y Geofísica
58	Neil Rabinowitz
59	Cortesía del Centro Nacional de Datos Climáticos
60-61	Jerry Gay
62	Laurie Grace
63	Marc Wexler (*izquierda*), Peter Ginter (*derecha*)
64-65	Christoph Blumrich (*dibujos*), Laurie Grace (*gráficas*); Robert K. Moyzis (*telómeros*)
67	Slim Films
68	Dimitry Schidlovsky
69-70	Hanna Damasio
71	Remi Benali
72-73	SETI@HOME, Universidad de California en Berkeley
74	Seth Shostak, Instituto SETI
75	Instituto SETI
76	Ron Miller (*arriba*), Laboratorio de Propulsión a Chorro/NASA (*abajo*)
77	Instituto SETI
79	Peter Menzel
80	Jesse Easudes
81	Space Channel/Philip Saunders/ Gordon Chapman
82	Frog Navigation Systems
83	Peter Menzel
84	Hans Moravec
85	Peter Menzel

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Xavier Roqué: *La ciencia del nuevo milenio*; Néstor Herrán: *La unificación de la física*; Juan Pedro Campos: *Exploración del universo*; Esteban Santiago: *El código de la vida, descifrado*; Marcos Díaz y José F. Bartolomé: *Bases genéticas y ambientales de la conducta*; Manuel Puigcerver: *Influencia del hombre sobre el clima*; Ana M.ª Rubio: *¿Podemos retardar el envejecimiento?*; Margarita Martí e Ignacio Morgado: *Creación cerebral de la mente*; Luis Bou: *¿Existe vida en otro lugar del universo?* y *Juegos matemáticos*; Angel Garcimartín: *Perfiles* y *Nexos*; J. Vilardell: *Hace...* e *Ideas aplicadas*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Philip M. Yam, *News Editor*; Ricki L. Rusting, *Senior Associate Editor*; Timothy M. Beardsley y Gary Stix, *Associate Editors*; W. Wayt Gibbs, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler, *On-Line Editor*; Mark Alpert, Carol Ezzell, Alden M. Hayashi, Steve Mirsky, Madhusree Mukerjee, George Musser, Sasha Nemecek, Sarah Simpson y Glenn Zorpette, *Editors;* Graham P. Collins; Marguerite Holloway y Paul Wallich, *Contributing Editors*
PRODUCTION William Sherman
CHAIRMAN Rolf Grisebach
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Joachim P. Rosler

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44
Fax 93 414 54 13

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	8.800 pta.	16.000 pta.
	52,89 euro	96,16 euro
Extranjero	11.150 pta.	20.700 pta.
	67,01 euro	124,41 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pta. 4,81 euro
Extraordinario: 1.000 pta. 6,01 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 484 39 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 93 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 91 409 70 45 – Fax 91 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 93 321 21 14
Fax 93 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

LA ONU CONTRA LA DESTRUCCIÓN EN MASA. «Sé que hay personas cuyos esfuerzos parecen orientarse a señalar cuán irreconciliable es el abismo que hoy divide al mundo y no a tender puentes sobre ese abismo. Todos deberíamos saber ya que otra guerra, con las armas de destrucción en masa que hay en los arsenales, supondría la destrucción de todos los sistemas políticos, económicos y sociales existentes y haría retroceder mil años a la civilización. —Trygve Lie, Secretario General de Naciones Unidas»

A LA LUZ DE LA EVOLUCIÓN. «La objeción más grave contra la moderna teoría de la evolución es que, dado que las mutaciones surgen aleatoriamente y sin propósito, cuesta comprender cómo pueden sumarse mutación y selección para formar unos órganos tan complejos y bellos como, por ejemplo, el ojo humano. Es realmente abusar de la credulidad suponer que una venturosa combinación repentina de mutaciones azarosas dotó de ojos, con toda la perfección de éstos, a la progenie de una criatura que carecía de ellos; éstos son el resultado de un desarrollo evolutivo que duró millones de años. En el transcurso de esa evolución los rudimentos del ojo atravesaron innúmeras etapas, todas las cuales fueron útiles a sus poseedores. —Theodosius Dobzhansky»

...cien años

RADIO. «Sklodowska Curie ha acometido la determinación del peso atómico del bario. Para ello, sometió a destilación fraccionada una masa de cloruro de bario radiante, extraída de media tonelada de residuos de uranio aportados por el gobierno austríaco. Los valores así obtenidos oscilaron entre 140 y 145,8, frente a 137,7 de peso atómico del bario inerte hallado a la vez. Queda así indeterminado el peso atómico del bario, pero se evidencia que el bario no es un estado alotrópico del bario, pues no hay formas alotrópicas de un elemento que posean pesos atómicos distintos.»

ZULÚ. «De acuerdo con las estadísticas, habría mil ciento cincuenta y una tribus nativas distintas en Sudáfrica, al sur del río Zambeze, entre ellas los zulúes. La dermis de éstos es transparente, hasta el punto de que bajo ella puede verse el fluir de la sangre. Constituye ello el máximo orgullo de los zulúes. Uno de ellos se señalará a la piel como prueba de que es un zulú de pura cepa. En la fotografía se muestran dos zulúes solteros. Los casados llevan una banda alrededor del cabello, mientras que los que siguen en la infelicidad del celibato no lucen tal emblema.»



Zulúes

LO ÚLTIMO DE BÚFALO II. «Al redactor jefe: ¿Qué mente racional podría ver con complacencia la carga enloquecida de una gran manada de un millón de búfalos contra todos los pueblos y vallados de Minnesota a Texas? Por donde antaño vagaba sin trabas el pionero de las praderas, hoy pacen en sosiego incontables rebaños de ganado. Para los museos quedan búfalos suficientes.»

EL NUEVO SIGLO. «En la prensa diaria encontramos una feroz batalla epistolar rugiente entre los que creen que el año 1899 señala el fin del siglo XIX y los que mantienen que hasta 1901 no cruzaremos el umbral de la nueva era. Parece muy difícil entender que 1800, 1900, 2000, designa no el comienzo, sino el fin de un siglo. Es evidente que nunca hubo un año 0, que el siglo debe empezar con un 1. Hace un siglo se libró la misma guerra verbal; de aquí a cien años se renovará.»

...ciento cincuenta años

NUEVO FUSIL PRUSIANO. «Noticias del famoso fusil prusiano de retrocarga: la infantería ligera del ejército prusiano está por completo armada con esta terrible arma, y en la última guerra con los daneses, y en algunos enfrentamientos con el pueblo, se probó tremendamente ventajosa para Prusia. Se diferencia mucho de todas las demás armas de fuego de retrocarga. Emplea un cartucho distinto y no usa pólvora fulminante sino una aguja de fricción (*percutor*) que perfora el fondo del cartucho de cartón y prende la pólvora con un detonador inflamable por fricción. Es eficaz en tiempo tanto seco cómo húmedo. Puede impulsar una bala hasta unos 250 metros. Hace diez disparos en un minuto.» [*El fusil Dreyse se considera el precursor de todos los fusiles de retrocarga modernos.*]

QUÍMICA ESTELAR. «Se ha demostrado la imposibilidad de que el sistema de vida animal y vegetal de nuestro planeta pueda existir en otros planetas y cuerpos celestes. La superficie de la Luna, sin mar ni atmósfera, la variable calidad de meteoritos y eolitos, cuyas sustancias constitutivas se han descubierto mediante análisis, se cuentan entre los datos en los que se cimienta el argumento de que las estrellas no son *telúricas* y, por tanto, que la vida en esos orbes debe sustentarse de modo diferente.»

La ciencia del nuevo milenio

Es muy probable que ni siquiera barruntemos por dónde irán los descubrimientos principales de los próximos 50 años

John Maddox

Las preguntas que todavía no sabemos formular polarizarán la atención de los científicos en los próximos cincuenta años. Lo enseña la historia. Miremos en qué estado se hallaba la ciencia cien años atrás, en 1899. Entonces, como ahora, se reflexionaba sobre los avances del siglo transcurrido. Uno de los logros más duraderos era la prueba ofrecida por John Dalton en 1808 de la constitución atómica de la materia. Otro era la demostración (por James Prescott Joule, en 1851) de la conservación de la energía y la hipótesis que le precedió (esbozada por Sadi Carnot) sobre la limitación intrínseca de la capacidad de transformar una forma de energía en otra. Ambos desarrollos condujeron a la termodinámica y a la idea de que las leyes fundamentales de la naturaleza incorporaban una "flecha del tiempo".

Por otra parte, la obra de Charles Darwin *El origen de las especies*, publicada en 1859, pretendía explicar la diversidad de la vida sobre la Tierra sin decir nada sobre los mecanismos de la herencia o siquiera sobre las razones por las que no cabía un cruzamiento viable fértil entre especies emparentadas aunque distintas. Por último, en la lista de logros que podía exhibir con satisfacción el siglo XIX, se hallaba la unificación de electricidad y magnetismo, realizada por James Clerk Maxwell mediante un conjunto de ecuaciones matemáticas del más puro estilo newtoniano. En general, la aplicación de las leyes de Newton se había refinado hasta el extremo de ofrecer una solución para cualquier problema real bien planteado. ¡El XIX había sido un siglo maravilloso!

Había que ser muy perspicaz para percibir, en 1899, los puntos débiles del armazón. Hendrik Antoon Lorentz, de la Universidad de Leiden, vio que la teoría de Maxwell implicaba una contradicción: la teoría suponía la existencia de un éter omnipresente a través del cual se propagaban las perturbaciones electromagnéticas, pero era mucho más simple suponer que el tiempo pasaba con parsimonia mayor en un objeto en movimiento respecto a un observador. Desde ahí bastó dar un pequeño paso (con la ayuda de Henri Poincaré, de la Universidad de París) para alcanzar la teoría especial de la relativi-

1. La visión de la Tierra desde la Luna anuncia una nueva forma de ver nuestro mundo y sus habitantes, pero apenas nos permite prever la forma que adoptarán futuros descubrimientos.

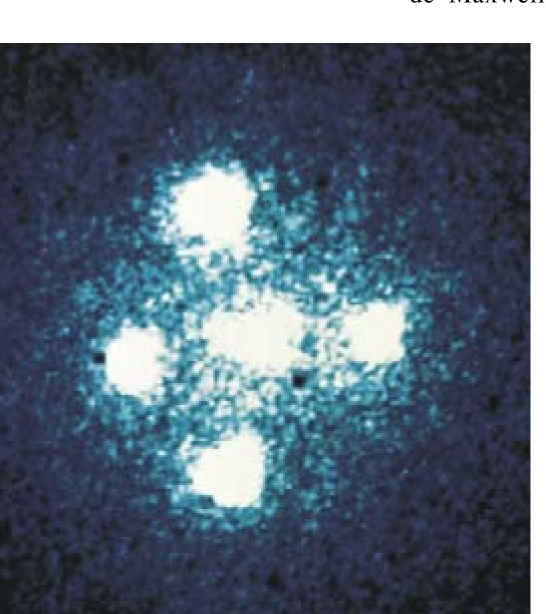




Nuestra comprensión del cerebro humano es incompleta en un aspecto muy significativo: nadie sabe cómo se toman decisiones ni cómo trabaja la imaginación.

dad de Albert Einstein, publicada en 1905. La teoría especial, con su implicación de que las velocidades relativas no pueden superar la velocidad de la luz, sólo contradice a la teoría newtoniana en el terreno de la filosofía: ni el espacio ni el tiempo pueden proporcionar una trama invisible que permita establecer la posición de un objeto, o determinar el instante en que alcanza esa posición. Hace un siglo pocos parecían haberse enterado de que la explicación más sencilla de los experimentos realizados por A. A. Michelson y E. W. Morley en los años ochenta era, simplemente, que el éter de Maxwell no existía.

A quienes incomodaba, si no ofendía, la complacencia dominante en 1899, podían encontrar muchos otros indicios de que la ciencia fundamental del momento estaba en aprietos. Si los átomos eran indivisibles, ¿cómo se explicaba que los radiactivos, descubiertos en 1897, emitieran fragmentos de átomo, como electrones y todo tipo de "rayos"? Del mismo modo, aunque Darwin había supuesto que los cambios hereditarios (hoy diríamos "genéticos") en la constitución de los individuos eran siempre pequeños, el redescubrimiento, sobre todo por Hugo de Vries, del trabajo realizado por Gregor Mendel cincuenta años antes sugería que los cambios genéticos espontáneos eran, en realidad, discretos y substanciales. Bajo el liderazgo de Thomas Hunt Morgan, esta percepción hizo de la Universidad neoyorquina de Columbia la meca de la genética clásica (expresión acuñada en los años sesenta del siglo XX); en los años treinta de la misma centuria, se reconoció que la contradicción entre darwinismo y "mendelismo morganiano" (así dio en llamarse al trabajo de Columbia en la URSS de los cincuenta) no era tan tajante como parecía en un principio.



2. Uno de los hitos de la ciencia del siglo XX, la teoría de la relatividad general de Einstein, describe la gravedad como una curvatura del espacio-tiempo, prediciendo efectos como la desviación de los rayos de luz ante la presencia de masas considerables. Esta imagen de lo que se conoce como Cruz de Einstein, obtenida por el Telescopio Espacial Hubble, es un buen ejemplo. Cuatro imágenes de un quásar rodean la imagen central de la galaxia, que actúa como una lente gravitatoria.

Nos asombra hoy la manera en que se han resuelto estas y otras contradicciones. La satisfacción que nos produce el siglo XX supera la de 1899. Y qué decir de la sensación de liberación personal que nos han brindado las aplicaciones de la ciencia de los primeros decenios de esa centuria —la emisión por Marconi de ondas de radio a través del Atlántico o el vuelo de una milla de los hermanos Wright, en una máquina más pesada que el aire (no sin haber construido un primitivo túnel de viento en su taller de Ohio antes de levantar el vuelo). De ahí nacieron las industrias de las comunicaciones y aeronáutica. Nuestros despachos están ocupados por potentes computadoras que nadie anticipó en 1900. Y sólo hay que pensar en la penicilina para ver que gozamos también de mejores condiciones sanitarias.

Lo que sabemos

En lo que respecta a la ciencia fundamental, tenemos tantos o más motivos de orgullo que los que tenía el siglo XIX. La teoría de la relatividad especial es algo más que una versión filosóficamente respetable de la teoría de Newton. La idea de que espacio y tiempo deben abordarse de la misma manera se ha convertido en un criterio crucial de validez de toda teoría fundamental de la física.

Apenas se columbraron los otros tres hitos de la ciencia fundamental del siglo XX. La teoría general de la relatividad de Einstein (1915), que mejor hubiera sido llamarla "teoría relativista de la gravitación", habría sorprendido a todo el mundo menos a los lectores atentos de Ernst Mach, físico y filósofo positivista vienés. Al proponer que las fuerzas gravitatorias se deben a un campo que alcanza los confines del cosmos, Einstein lanzaba la idea de que la estructura y la evolución del universo estaban ligadas inextricablemente. Pero hasta Einstein se sorprendió cuando Edwin Hubble descubrió en 1929 la expansión del universo.

La mecánica cuántica también apareció como caída del cielo, aunque los científicos llevaran casi medio siglo interesándose por la radiación que emitían los objetos a medida que aumentaba su temperatura. El problema era explicar por qué la radiación dependía de la temperatura de tal forma que la frecuencia privilegiada de emisión era directamente proporcional a la temperatura, medida a partir del cero absoluto (fijado por la termodinámica del siglo XIX en 273 grados Celsius bajo cero). La solución ofrecida por Max Planck en 1900 era que un objeto caliente perdía energía únicamente en cantidades finitas (aunque muy pequeñas) llamadas cuantos. La energía de un cuanto depende de la frecuencia de la radiación; es proporcional a dicha frecuencia. Planck confesó no saber qué significaba ese fenómeno y sospechó que sus colegas andarían no menos desconcertados.

Las dificultades encontradas por Planck sólo se disiparon un cuarto de siglo después, gracias a los esfuerzos de Niels Bohr, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Paul Dirac y otras de las mentes más brillantes del siglo. Quién podía imaginar, en 1900, que el trabajo de Planck desembocaría en una nueva mecánica, tan ambiciosa como la de Newton en el sentido de que es aplicable a toda clase

de problema bien planteado, pero sólo en el ámbito de los átomos, las moléculas o sus partes constituyentes (electrones y demás).

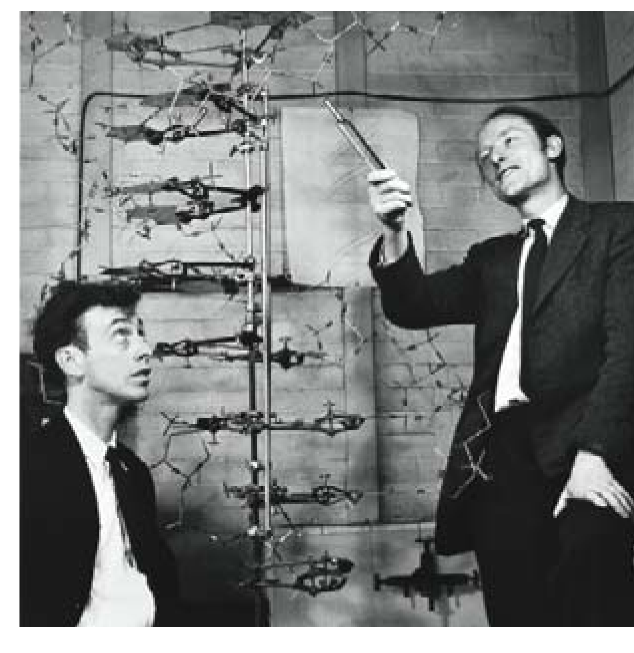
Todavía hay quien sostiene que la mecánica cuántica está llena de paradojas, pero es ésa una lectura parcial (y con frecuencia maliciosa) de lo que pasó en el primer cuarto del siglo XX. Nuestra comprensión intuitiva del comportamiento de los objetos en el mundo macroscópico (recogida por las leyes de Newton) se basa en la percepción de nuestros sentidos, resultado evolutivo ellos mismos de la selección natural en un mundo en el que evitar objetos macroscópicos (predadores) o capturarlos (alimento) favorecía la supervivencia de la especie. Es difícil imaginar qué ventaja selectiva les habría proporcionado a nuestros antepasados la capacidad de percibir el comportamiento de las partículas subatómicas. La mecánica cuántica no es una paradoja, sino un descubrimiento sobre la naturaleza de la realidad a escalas muy pequeñas, en el tiempo y en el espacio. Esta revelación nos ha permitido comprender la constitución de las partículas nucleares por quarks y componentes parecidos, un avance extraordinario, por provisional que sea.

La tercera sorpresa de la centuria vigésima tiene que ver con el descubrimiento de la estructura del ADN por James D. Watson y Francis Crick, en 1953. No se quiere decir con ello que Watson y Crick desconocieran la importancia de su descubrimiento. A principios de ese decenio resultaba harto embarazoso el desconocimiento de la estructura química de los genes, que según la escuela genética de Columbia estaban alineados en los cromosomas. La sorpresa fue que la estructura del ADN no sólo explicaba el mecanismo de la transmisión hereditaria de los caracteres de padres a hijos, sino también por qué las células de todos los organismos sobreviven milisegundo a milisegundo en la forma prescrita para ellas por la selección natural. Se había descorrido el velo del misterio de la vida.

Lo que ignoramos

La mecánica cuántica y la estructura del ADN han ensanchado el horizonte de nuestra comprensión del mundo, más allá de cuanto sus creadores pudieron imaginar. No es posible saber qué nuevo mundo de la ciencia se esconde bajo esa piedra humilde que alguien levante en los próximos 50 años. A lo sumo, podemos hacer un catálogo de todo lo que ignoramos —que no es poco— y proyectar hacia el futuro las actuales tendencias de investigación. Pero incluso este procedimiento sugiere que la ciencia del próximo medio siglo será tan interesante y asombrosa como la del XX entero. Nuestros hijos y nuestros nietos se maravillarán.

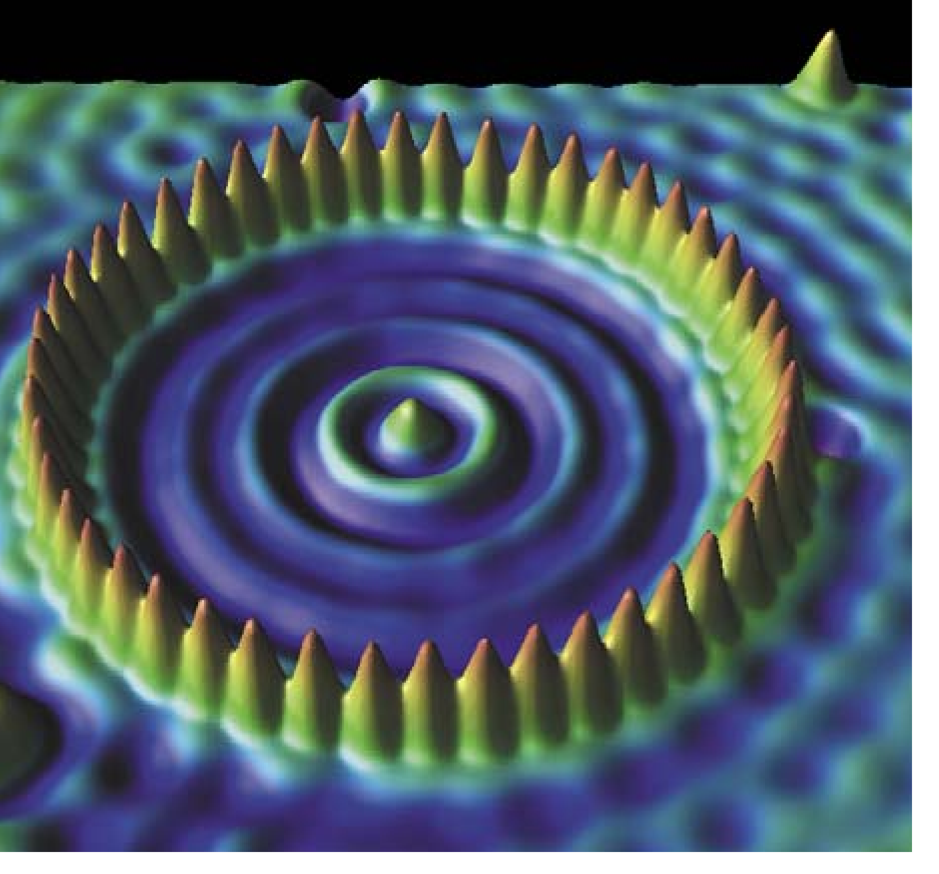
Uno de los logros que tenemos al alcance es la reconstrucción de la historia genética de la especie humana, *Homo sapiens*. A lo largo de los diez últimos años hemos desentrañado la genética de la ontogenia, la transformación de un embrión fecundado en adulto durante la gestación y la infancia. El plano corporal de animales y plantas se nos ofrece inicialmente cifrado por genes de una familia compartida (genes *Hox*) y, luego, por genes de desarrollo peculiares de cada especie. Aunque los biólogos moleculares siguen intentando averiguar los mecanismos de regulación de la secuencia jerárquica de los genes de desarrollo y los mecanismos de inactivación de los genes que han cumplido su tarea, es sólo cuestión de tiempo el que se ordenen los genes implicados en las sucesivas etapas del desarrollo humano.



3. En 1953, el descubrimiento de la estructura del ADN por James D. Watson (*a la izquierda*) y Francis Crick reveló el secreto de la vida, propiciando avances espectaculares en la medicina y la biología molecular. Su modelo, la doble hélice, se ha convertido en un símbolo universal de la ciencia.

Cabrá entonces establecer, mediante la comparación de los genes humanos y los del chimpancé, por ejemplo, cuándo y cómo aparecieron las diferencias cruciales entre los humanos y los primates. El registro fósil nos ha mostrado los aspectos básicos de esta historia. El tamaño del córtex cerebral de los homínidos ha crecido gradualmente a lo largo de los postreros 4,5 millones de años; los homínidos empezaron a caminar erguidos con *Homo erectus*, hace 2,1 millones de años; y la capacidad de hablar apareció, probablemente, con la Eva mitocondrial hace sólo 125.000 años. Conocer la base genética de estos cambios nos proporcionará una historia más fidedigna de nuestra especie y una comprensión más profunda del lugar que ocupamos en la naturaleza.

Este conocimiento tendrá consecuencias de gran transcendencia. Será posible inferir por qué algunas especies de homínidos, como los Neanderthales, no llegaron a sobrevivir. Lo que reviste mayor interés, la historia genética de *Homo sapiens* nos permitirá contrastar el mecanismo de la especiación o formación de nuevas especies. A pesar del título de la obra maestra de Darwin, *El origen de las especies*, su autor no tenía qué proponer sobre el cruzamiento inviable entre especies diferentes. Sin embargo, la diferencia genética más notable entre los humanos y los primates es que los humanos tenemos 46 cromosomas (23 pares), mientras que nuestros parientes próximos tienen 48. (La mayor parte del material cromosómico ausente parece estar al final del cromosoma humano 2, pero otros fragmentos aparecen en otros lugares del genoma humano, especialmente en el cromosoma X.) Será importante para la biología saber si esta redistribución de los cromosomas fue la causa principal de la evolución humana o si



4. La mecánica cuántica, otro de los grandes logros intelectuales del siglo XX, puso de manifiesto la naturaleza de la realidad a escalas microscópicas. Actualmente podemos manipular y visualizar átomos individuales y ondas cuánticas. Esta imagen de un microscopio electrónico de efecto túnel muestra un "corral cuántico" de 48 átomos de hierro sobre una superficie de cobre que encierra ondas cuánticas de electrones.

es una mera consecuencia secundaria de una mutación genética.

Los próximos 50 años verán también intensificarse los esfuerzos por identificar las correlaciones genéticas evolutivas. La comparación entre secuencias de aminoácidos de proteínas similares, procedentes de especies emparentadas, o entre secuencias de nucleótidos de ácidos nucleicos relacionadas entre sí —en particular de las moléculas de ARN en ribosomas—, permitirá, en principio, establecer la edad del antepasado común a ambas especies; bastará con saber la cadencia natural de mutación de las moléculas en cuestión.

No será tarea fácil. Las tasas de mutación varían de una proteína o molécula de ácido nucleico a otra, y a lo largo de una misma. La construcción de un "reloj molecular" más fiable es un objetivo cercano. (Ese empeño, aunque más formidable, recuerda el de los cosmólogos por construir una escala de espacio fiable para el universo.) Cuando lo alcancemos, estaremos preparados para aventurar las causas de los grandes puntos de inflexión en la evolución de la vida sobre la Tierra: la evolución del ciclo de Krebs, que permite a todas las células —excluidas las bacterianas— transformar metabolitos químicos en energía, el origen de la fotosíntesis o la aparición de los primeros organismos pluricelulares, que sabemos aconteció hace más de 2500 millones de años.

Con suerte, aprenderemos algo también sobre el papel desempeñado por agentes similares a virus en el alba de la vida. El genoma humano está plagado de secuencias de ADN que parecen fósiles de ácido nucleico pertenecientes a una etapa en la que la información genética pasaba de una especie a otra con la misma facilidad con la que las bacterias adquieren hoy determinadas propiedades (la resistencia a los antibióticos, por ejemplo) mediante el intercambio de plásmidos, unas estructuras de ADN. No sabremos con exactitud qué lugar ocupamos en la naturaleza hasta que hayamos comprendido el papel evolutivo del ADN aparentemente inútil del genoma humano (la "morralla" de Crick).

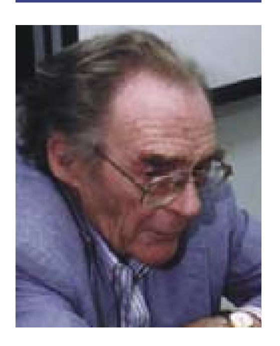
Comprender todos los genomas de los que conocemos la estructura completa no nos mostrará, sin más, el origen de la vida como tal. Pero aclarará, probablemente, la naturaleza de los seres vivos en el mundo de ARN que suponemos precedió a la vida de ADN en que estamos sumergidos. Algo debe querer indicarnos el que las células modernas sigan empleando moléculas de ARN para determinadas funciones básicas: la edición de ADN en el núcleo o la construcción de telómeros, estructuras estabilizadoras de los extremos de los cromosomas.

Llegará el día, aunque puede que no sea en los próximos cincuenta años, en que alguien intentará crear un organismo a partir de ARN. Pero el problema del origen de la vida a partir de compuestos inorgánicos requiere un conocimiento del que carecemos; por lo menos desentrañar el mecanismo en cuya virtud el flujo de radiación —así la solar— puede, con el tiempo, inducir la formación de compuestos químicos complejos a partir de compuestos simples. Sabemos que algo parecido ocurre en nubes moleculares gigantes de nuestra galaxia, en las que los radioastrónomos han encontrado compuestos más y más complejos, como en el caso reciente de los fullerenos C60. Necesitamos ahondar más en la relación entre complejidad y flujo de radiación, un problema de termodinámica irreversible al que no se ha prestado suficiente atención.

En las últimas décadas los biólogos apenas se han detenido en los aspectos cuantitativos de su trabajo. Su actitud es comprensible si se tiene en cuenta que hay tantos datos interesantes (e importantes) por recoger. Pero hemos alcanzado un punto en el que la comprensión profunda del funcionamiento de la célula y otras cuestiones fundamentales se ve impedida por la simplificación habitual de la realidad en genética y en biología celular, así como por la avalancha de datos que no dejan de acumularse. ¿Simplificación? En genética se habla de la "función" del gen que se acaba de descubrir. Pero, ¿y si la mayoría de los genes del genoma humano, o al menos las proteínas que determinan, tuvieran más de una función o incluso funciones antagónicas? En este caso, la descripción en lenguaje común de los fenómenos celulares sería equívoca o no tendría sentido, a menos que viniera avalada por algún modelo cuantitativo.

Se nos da un ejemplo exasperante en el ciclo de división celular. En los últimos años, no ha pasado semana sin que se descubriera una nueva enzima implicada en el proceso. Identifi-

EL AUTOR



Sir JOHN MADDOX fue profesor de física teórica en la Universidad de Manchester de 1949 a 1956. Dirigió *Nature* entre 1966 y 1973, y de nuevo de 1980 a 1995. En 1985 fue nombrado *sir* por sus servicios a la ciencia.

car un complejo proteínico que desencadena la división celular (por lo menos en la levadura) constituye un éxito notable, pero seguimos sin saber por qué este complejo cumple esa misión desencadenante y de qué modo se activa, a su vez, por agentes internos o externos a la célula. Estas preguntas seguirán abiertas hasta que se elaboren modelos numéricos de células enteras, lo que no constituye tanto una predicción cuanto un deseo.

El catálogo de nuestra ignorancia incluye también la comprensión del cerebro humano, que presenta una gran laguna: nadie sabe cómo se toman las decisiones o qué estimula la imaginación. Igual de enigmática es la naturaleza de la consciencia o cómo debemos definirla. Pese a los grandes avances de las neurociencias en el siglo XX, por no hablar de la propiedad discutida de una inteligencia artificial, apenas hemos avanzado en nuestra comprensión de los procesos cognitivos. El problema está en identificar los patrones de comportamiento de las neuronas cerebrales que señalan la toma de una decisión o cualquier otra actividad cognitiva. La investigación se verá complicada por la posibilidad de que la toma de una decisión tenga varios correlatos neuronales, pero no debemos suponer por ello que el problema sea inabordable. Hasta los animales no humanos (como las ratas en un laberinto) toman decisiones aunque no sean conscientes de hacerlo, lo que posibilita la observación y la experimentación. Pero las neurociencias no tendrán nada de que avergonzarse si dentro de 50 años siguen desconociendo la respuesta a estas cuestiones.



El problema más importante de la física fundamental es que la mecánica cuántica y la teoría de la gravitación de Einstein son incompatibles entre sí.

Lo mismo puede decirse del problema central de la física fundamental, que concierne a la incompatibilidad entre la mecánica cuántica y la teoría de la gravitación de Einstein. En los últimos veinte años hemos aprendido mucho de los intentos infructuosos por "cuantizar" el campo gravitatorio. Ahora bien, si no se tiende algún tipo de puente entre ambas teorías, dos de los hitos del siglo XX, no será posible describir con un mínimo de rigor la gran explosión con la que se supone que empezó el universo. La duda se ha extendido a la física de las partículas elementales, que lleva años tras el objetivo último de unificar las cuatro fuerzas de la naturaleza. Los proponentes de la teoría de cuerdas creen que su trabajo proporciona un puente aceptable, pero otros, menos optimistas, señalan que el entusiasmo ha ido disminuyendo con los años. De aquí a medio siglo sabremos, a buen seguro, de parte de quién estaba la razón.

¿No es mucho tiempo para resolver lo que parece ser un simple problema matemático? Tal vez, pero no debiera sorprendernos que sean necesarias unas cuantas décadas más para aclarar si la teoría de cuerdas es una descripción cierta de las partículas de materia, o tan sólo una vía muerta. No olvidemos que, en el siglo XIX, pasaron tres décadas entre la demostración experimental de Faraday de que electricidad y magnetismo eran aspectos del mismo fenómeno y la formulación por Maxwell de la teoría electromagnética. Entonces, las matemáticas que precisó Maxwell estaban recogidas en los libros de texto; ahora, los investigadores de la teoría de cuerdas deben inventarlas a cada paso. Por otro lado, si la teoría de cuerdas consigue unir gravitación y mecánica cuántica, proporcionará también una nueva imagen de las partículas elementales de materia, dotando al espacio y al tiempo de una suerte de estructura microscópica a una escala tan pequeña, que sería invisible tanto para los aceleradores actuales como para los que están proyectados. Hoy por hoy, no hay datos experimentales definitivos, por lo que debemos ser pacientes.

Pese a la ilusión de que los descubrimientos se suceden con celeridad creciente, importa señalar que en algunos ámbitos de la ciencia los avances requieren mucho tiempo y un enorme esfuerzo colectivo. Las naves que exploran el sistema solar suelen diseñarse diez años antes de su lanzamiento. Ha sido necesario un siglo de sismología para que dispusiéramos de técnicas de medida y de análisis lo bastante sensibles para observar el interior del planeta en el que vivimos; la imagen resultante mostrará las plumas de convección del manto que arrastran a las placas tectónicas a través de la superficie terrestre. Desde los años sesenta, los biólogos moleculares intentan comprender los mecanismos de regulación de los genes de los organismos vivos, pero todavía no comprenden siquiera la más simple bacteria. Por último, tendremos suerte si en los próximos cincuenta años identificamos los correlatos neuronales del pensamiento. La aplicación de lo que ya sabemos nos permitirá seguir avanzando, pero muchas cuestiones importantes sólo serán resueltas con gran dificultad.

Los resultados nos sorprenderán. El descubrimiento de vida en cualquier punto de nuestra galaxia cambiaría radicalmente nuestra opinión sobre el lugar que ocupamos en la naturaleza. Habrá sorpresas más sutiles que no podemos prever. Tales sorpresas han animado una y otra vez a la ciencia durante los últimos quinientos años y, en los próximos cincuenta, extasiarán a los investigadores y cambiarán la vida del resto de la humanidad.

La unificación de la física

Los experimentos que se realicen en el CERN y en otros laboratorios deberán permitir culminar el modelo estándar de la física de partículas. Sin embargo, habrá que aportar ideas de nuevo cuño si queremos trenzar una teoría unificada de todas las fuerzas

Steven Weinberg

Compete a la física entender la unidad entrañada en la maravillosa diversidad de la naturaleza. En esa dirección se han dado pasos importantes. Newton unió la mecánica terrestre con la celeste en el siglo XVII; dos centurias más tarde, James Clerk Maxwell unificaba la óptica con la electricidad y el magnetismo. Entre 1905 y 1916 Einstein unificó la geometría del espacio-tiempo y la teoría de la gravitación; un decenio después, pergeñada la mecánica cuántica, se unieron química y física atómica.

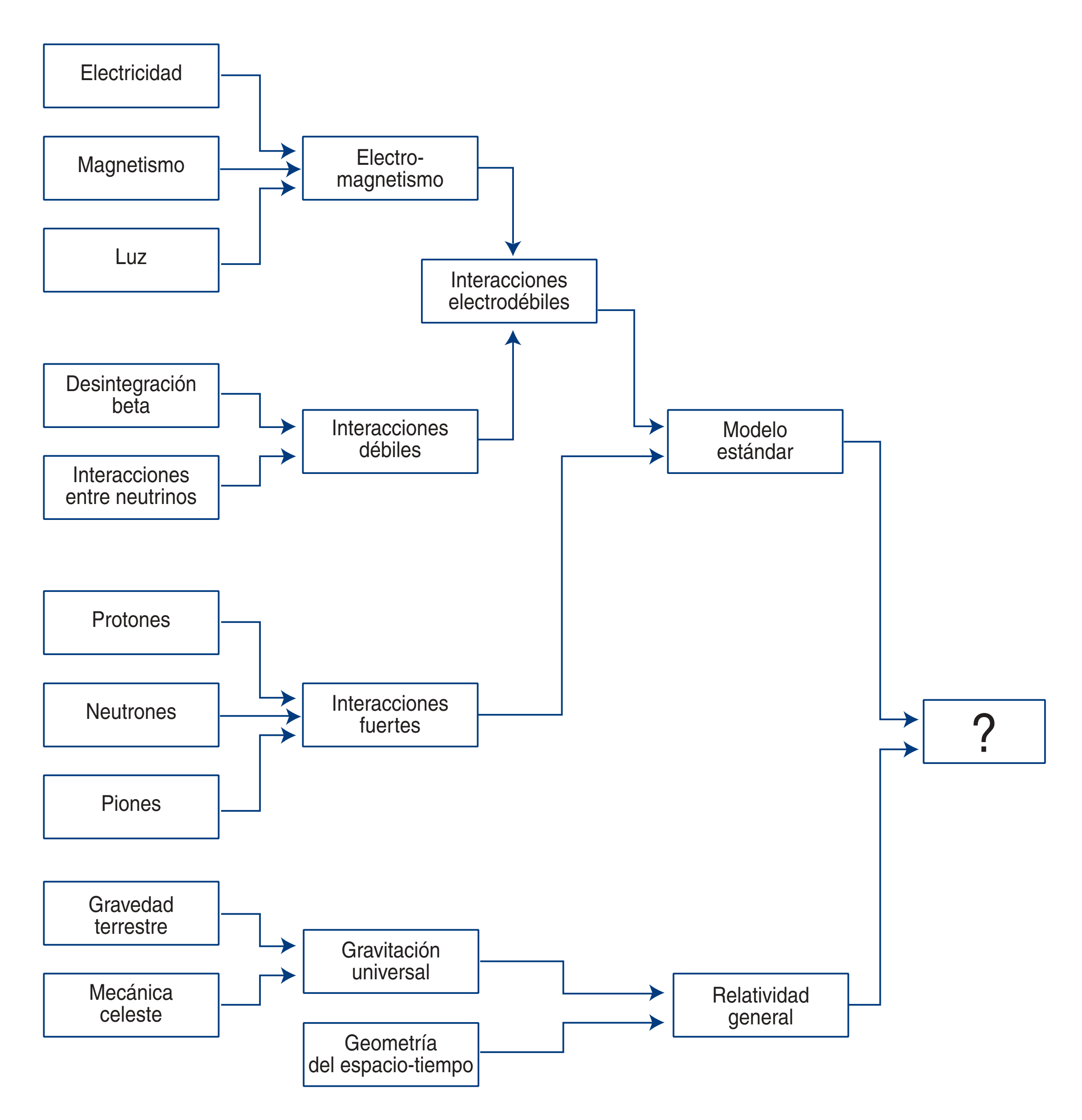
Einstein dedicó los últimos treinta años de su vida a la búsqueda infructuosa de una "teoría de campos unificada", que uniría la relatividad general, su propia teoría del espacio-tiempo y gravitación, con la teoría del electromagnetismo de Maxwell. En tiempo más reciente se han realizado progresos hacia la unificación, aunque en dirección distinta. Nuestra teoría actual de las fuerzas y partículas elementales, el modelo estándar, ha unificado el electromagnetismo y las interacciones débiles (las fuerzas responsables de la transformación mutua de neutrones y protones en los procesos radiactivos y en el interior de las estrellas). El modelo estándar ofrece también una descripción parecida, aunque independiente, de las interacciones fuertes, que mantienen unidos los quarks dentro de protones y neutrones y, dentro de los núcleos atómicos, unidos los protones y neutrones.

Algunas ideas se han ido asentando sobre cómo unificar la teoría de las interacciones fuertes con la teoría de las interacciones débiles y electromagnéticas, lo que se denomina a menudo "gran unificación". Pero sólo hallarán pleno encaje cuando incluyan la gravedad, problema nada fácil. Se conjetura que las diferencias manifestadas por estas fuerzas surgieron al inicio de la gran explosión. Pero no podemos comprender los instantes iniciales de la historia cósmica sin una teoría mejor de la gravitación y de las demás fuerzas.

1. La naturaleza cuántica del espacio y el tiempo tiene que resolverse en el seno de una teoría unificada. A pequeña escala, el espacio podría ser una estructura de cuerdas y membranas tramada sin solución de continuidad. O algo todavía más extraño.



2. Desde hace tiempo, el tema central de la física lo constituye la unificación de fenómenos dispares en el marco de una misma teoría. El modelo estándar de la física de partículas describe tres de las cuatro fuerzas conocidas de la naturaleza (el electromagnetismo, las interacciones débiles y las interacciones fuertes), pero aún debe unificarse con la relatividad general, que da cuenta de la fuerza de la gravedad y la naturaleza del espacio-tiempo.



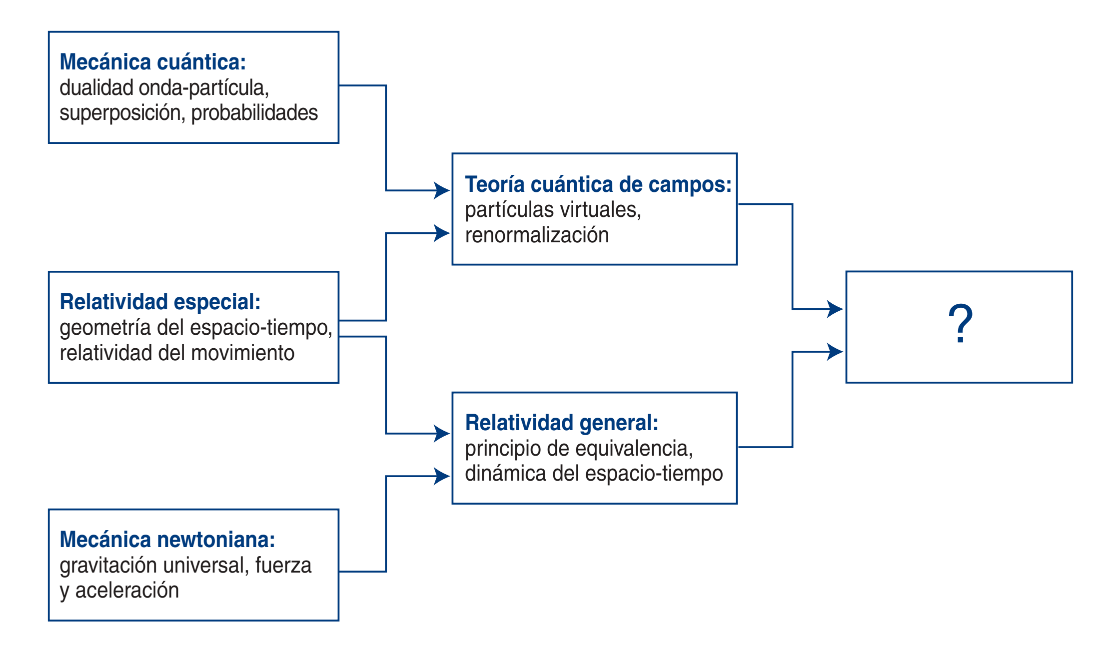
Es posible, aunque no seguro, que el trabajo de unificación alcance su coronación antes del año 2050.

Campos cuánticos

El modelo estándar es una teoría cuántica de campos. Sus componentes básicos son campos, como el eléctrico y el magnético de la electrodinámica del siglo XIX. La energía y el momento se transmiten en su seno mediante pequeñas ondas que, según la mecánica cuántica, aparecen en forma de paquetes, o cuantos, y se identifican en el laboratorio como partículas elementales. Así, el cuanto del campo electromagnético es una partícula llamada fotón.

El modelo estándar asocia un campo a cada tipo de partícula elemental. Existen campos de leptones, cuyos cuantos son los electrones que forman las capas externas de los átomos, los muones y tauones (partículas similares a los electrones, si bien más pesadas) y unas partículas eléctricamente neutras emparentadas con las anteriores: los neutrinos. Hay campos para las distintas clases de quarks, algunas de las cuales se agrupan en protones y neutrones que conforman los núcleos atómicos. Las fuerzas ejercidas entre estas partículas se producen mediante el intercambio de fotones y partículas elementales similares: las partículas W^+, W^- y Z^0 transmiten la interacción débil; las interacciones fuertes se realizan por mediación de ocho especies de gluones.

Todas estas partículas exhiben masas harto dispares, distribuidas sin ningún patrón reconocible. El electrón es 350.000 veces más ligero que el quark más pesado; los neutrinos son más ligeros todavía. El modelo estándar carece de recursos propios para explicar dichas masas, salvo que incorporemos campos adicionales de tipo "escalar". La palabra "escalar" significa que estos campos, a diferencia de los campos eléctricos, magnéticos y otros campos del modelo estándar, no muestran ninguna dirección espacial. Esto posibilita



3. Se producen los grandes avances de la física fundamental cuando se compatibilizan los principios de diferentes teorías en un mismo marco conceptual. Desconocemos qué principio básico subyace bajo la unificación de la relatividad general con la teoría cuántica de campos del modelo estándar.

que los campos escalares se extiendan por todo el espacio sin contradecir uno de los principios mejor establecidos de la física, a saber, que el espacio tiene el mismo aspecto en todas direcciones. (Si hubiera un potente campo magnético, podríamos utilizar una brújula ordinaria para identificar una dirección preferente en cualquier punto del espacio.) La interacción entre los campos del modelo estándar y campos escalares extendidos por todo el espacio daría, así se cree, a las partículas del modelo estándar las masas que presentan.

Más allá del quark cima

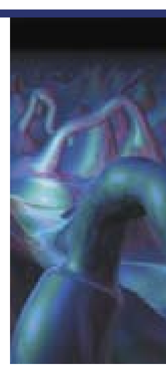
Para culminar el modelo estándar hemos de confirmar la existencia de los campos escalares y establecer los tipos que existen. Esto equivale a descubrir las partículas de Higgs, partículas identificables como los cuantos de tales campos. Tenemos buenas razones para esperar que esta tarea se realizará antes del año 2020, cuando el Gran Colisionador de Hadrones del CERN lleve funcionando un decenio largo.

Como mínimo se descubrirá una nueva partícula escalar neutra, sin carga eléctrica. Si ése fuera el único descubrimiento hasta el año 2020, sería un desastre, por una razón poderosa: no obtendríamos ninguna pista sobre el *problema de la jerarquía*, una cuestión crucial relacionada con las escalas de energía características de la física.

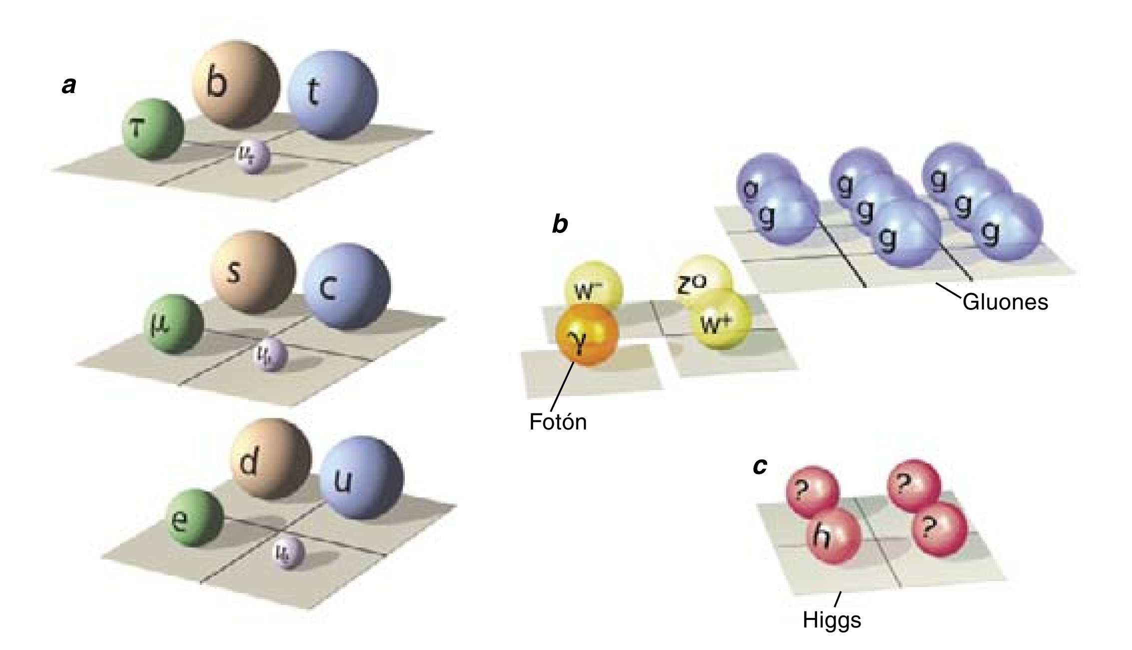
La partícula más pesada del modelo estándar es el quark cima, cuya masa equivale a una energía de 175 gigaelectronvolts (GeV). (La energía contenida en un GeV es ligeramente superior a la contenida en la masa del protón.) Se supone que las partículas de Higgs por descubrir tendrán masas parecidas, de cien hasta varios centenares de GeV. Pero hay indicios de una escala de masas mucho mayor, que surgirá de las ecuaciones de la teoría unificada, cuando se formule. En el modelo estándar, los campos del gluon, del fotón y de las partículas *W* y *Z* ejercen interacciones de diferente intensidad con los demás campos del modelo. Por ese motivo, las fuerzas producidas mediante el intercambio de gluones centuplican la intensidad de las demás en condiciones normales. La gravedad es mucho más débil: en un átomo de hidrógeno, la atracción gravitatoria entre el electrón y el protón es unas 10^{-39} veces menor que la fuerza eléctrica.

Pero todas estas fuerzas de interacción dependen de la energía a la que se miden. Resulta sorprendente que, al extrapolar las interacciones de los campos del modelo estándar, todas las fuerzas se igualen entre sí a una energía de poco más de 10^{16} GeV y que la gravitación tenga la misma intensidad a una energía no mucho mayor, a unos 10^{18} GeV. (Se han sugerido ajustes de la teoría de la gravitación que igualarían su intensidad con la de las demás fuerzas a unos 10^{16} GeV.) En física de partículas estamos acostumbrados a diferencias bastante elevadas entre las masas de las partículas, como la relación 350.000 a 1 entre las masas del quark cima y del electrón; pero esto no es nada comparado con la gran diferencia entre la escala de energías de la unificación fundamental (10^{16} GeV o quizá 10^{18} GeV) y la escala de 100 GeV típica del modelo estándar. El quid del problema de la jerarquía estriba en explicar este cociente tan elevado, este salto descomunal de un nivel al siguiente en la jerarquía de escalas de energía. Y explicarlo no implica sólo ajustar constantes hasta obtener el cociente adecuado, sino también derivarlo de forma natural a partir de principios fundamentales.

La unificación no será el final de la física, pero nos ayudará a resolver el fenómeno de la turbulencia y la superconductividad a altas energías.



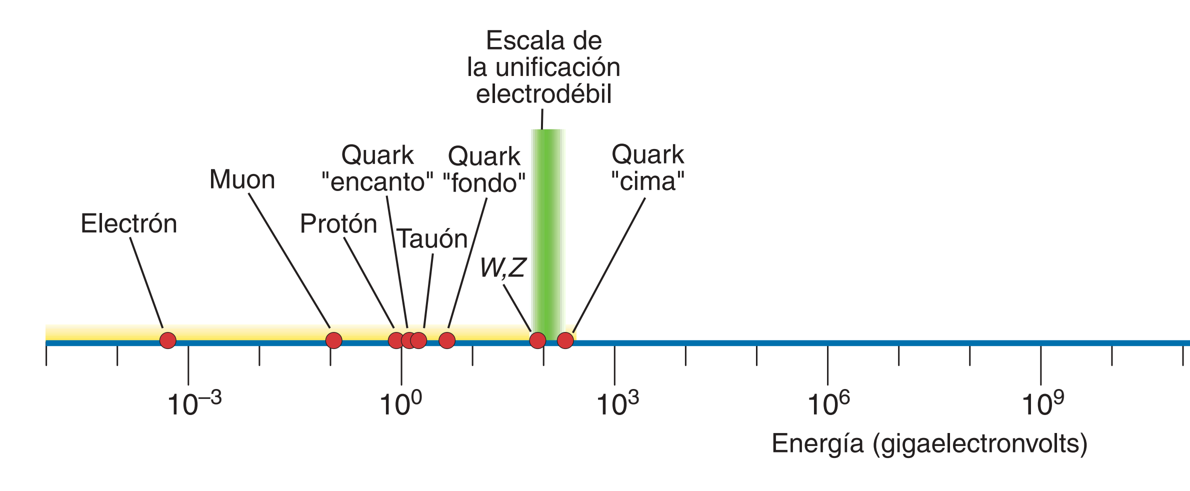
4. El modelo estándar de la física de partículas describe cada partícula de materia y cada fuerza con un campo cuántico. Las partículas de materia fundamentales son los fermiones, que aparecen en tres generaciones (*a*). Cada generación de partículas sigue el mismo patrón de propiedades. Los bosones (*b*) producen las fuerzas fundamentales y se organizan en tres simetrías estrechamente relacionadas. Además, una o más partículas o campos de Higgs (*c*) generan las masas de los demás campos.

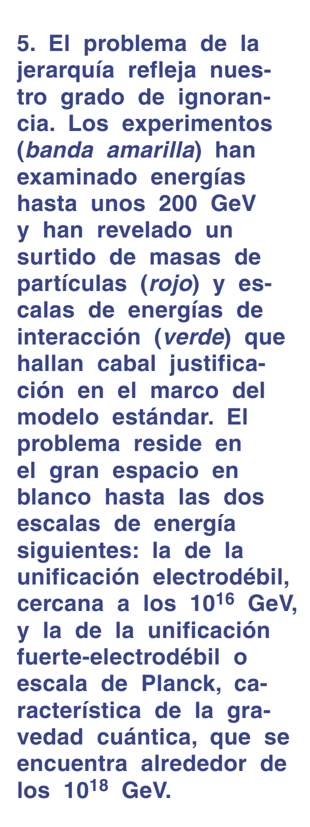


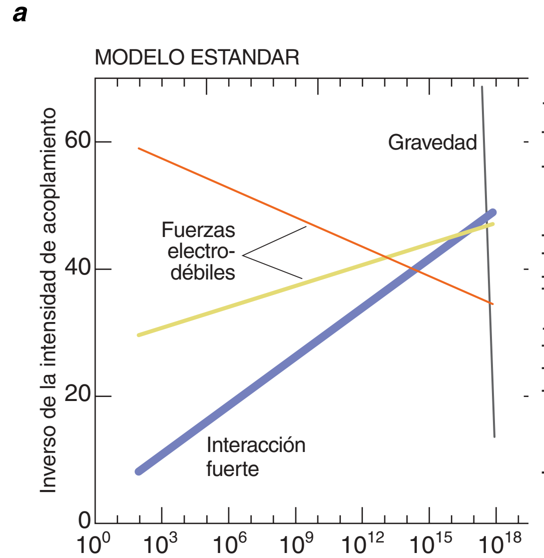
Los físicos teóricos han propuesto varias ideas interesantes para solucionar sin violencia el problema de la jerarquía: incorporación de un nuevo principio de simetría, la supersimetría (que hace más precisa la convergencia de las fuerzas de interacción a 10^{16} GeV), nuevas interacciones fuertes llamadas tecnicolor o ambas cosas a la vez. Estas teorías añaden fuerzas que se unifican con las interacciones fuerte, débil y electromagnética a energías del orden de los 10^{16} GeV, pero que no se pueden observar directamente porque no actúan sobre las partículas del modelo estándar. Sí actúan, en cambio, dichas fuerzas sobre otras partículas muy pesadas, que no podemos generar en nuestros laboratorios. Estas partículas "superpesadas" son, no obstante, mucho más ligeras que 10^{16} GeV porque adquieren su masa a partir de las nuevas fuerzas, que sólo son intensas muy por debajo de los 10^{16} GeV. En ese marco, las partículas del modelo estándar interaccionarían con las partículas "superpesadas" y sus masas aparecerían como efecto secundario de su interacción, bastante débil. Este mecanismo resolvería el problema de la jerarquía, haciendo que las partículas conocidas fueran más ligeras que las superpesadas, que a su vez son mucho más ligeras que 10^{16} GeV.

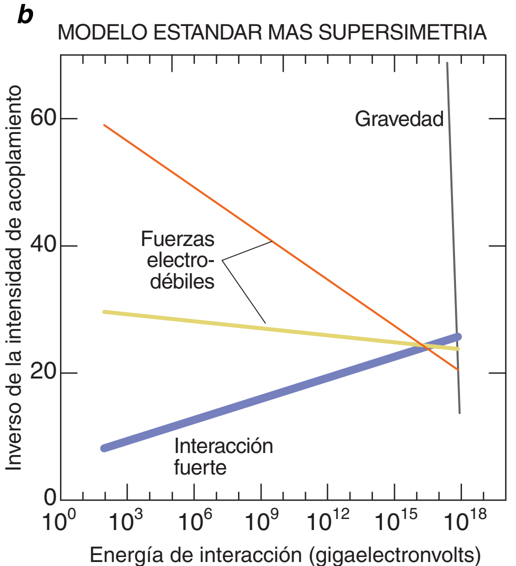
En esa gavilla de ideas descubrimos un denominador común: reclaman la existencia de un conjunto de partículas nuevas con masas no mucho mayores que 1000 GeV. Si hay algo cierto en tales propuestas, deberíamos encontrar esas partículas antes del año 2020 en el Gran Colisionador de Hadrones; algunas de ellas podrían incluso detectarse antes en el Fermilab o en el CERN, si bien pueden hacer falta más décadas y nuevos aceleradores para explorar sus propiedades. Cuando se descubran estas partículas y se midan sus propiedades, podremos decir si alguna de ellas sobrevivió a los primeros instantes de la gran explosión y daría cuenta ahora de la "materia oscura" del espacio intergaláctico, que parece constituir la mayor parte de la masa actual del universo. Sea cual sea el ritmo de los descubrimientos, todo indica que, para el año 2050, entenderemos las enormes diferencias en las escalas de energía fundamentales.

¿Qué sucederá entonces? No hay forma de acometer experimentos que involucren procesos a energías del orden de 10^{16} GeV por partícula. Con las técnicas actuales, la energía que un acelerador comunica a las partículas




5. El problema de la jerarquía refleja nuestro grado de ignorancia. Los experimentos (*banda amarilla*) han examinado energías hasta unos 200 GeV y han revelado un surtido de masas de partículas (*rojo*) y escalas de energías de interacción (*verde*) que hallan cabal justificación en el marco del modelo estándar. El problema reside en el gran espacio en blanco hasta las dos escalas de energía siguientes: la de la unificación electrodébil, cercana a los 10^{16} GeV, y la de la unificación fuerte-electrodébil o escala de Planck, característica de la gravedad cuántica, que se encuentra alrededor de los 10^{18} GeV.

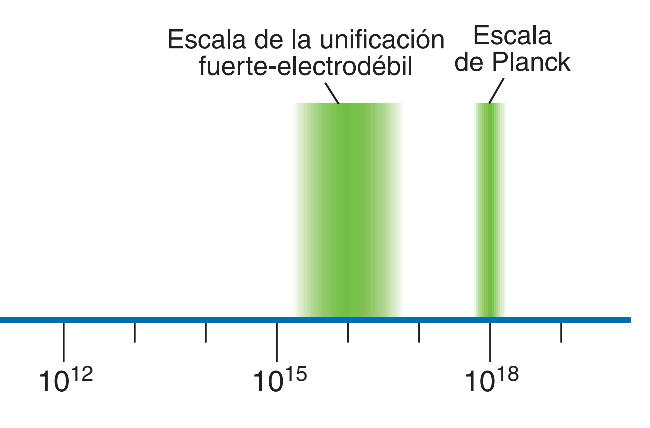




6. La extrapolación teórica muestra que las tres fuerzas del modelo estándar (la interacción fuerte y las fuerzas unificadas débil y electromagnética) tienen más o menos la misma intensidad a energías muy altas (*a*) y que la coincidencia mejora añadiendo la supersimetría (*b*). El grosor de las curvas refleja la indeterminación aproximada en el acoplamiento de intensidades.

es proporcional al diámetro de la máquina. La aceleración de partículas hasta una energía de 10^{16} GeV requeriría un acelerador de varios años luz de diámetro. Aun cuando se ideara otra manera de concentrar cantidades macroscópicas de energía en una sola partícula, sería demasiado baja la frecuencia de procesos interesantes a estas energías para generar información útil. Mas aunque no podamos estudiar directamente procesos a energías de 10^{16} GeV, es muy probable que estos procesos produzcan efectos a energías accesibles y detectables, que serían inexplicables por el modelo estándar.

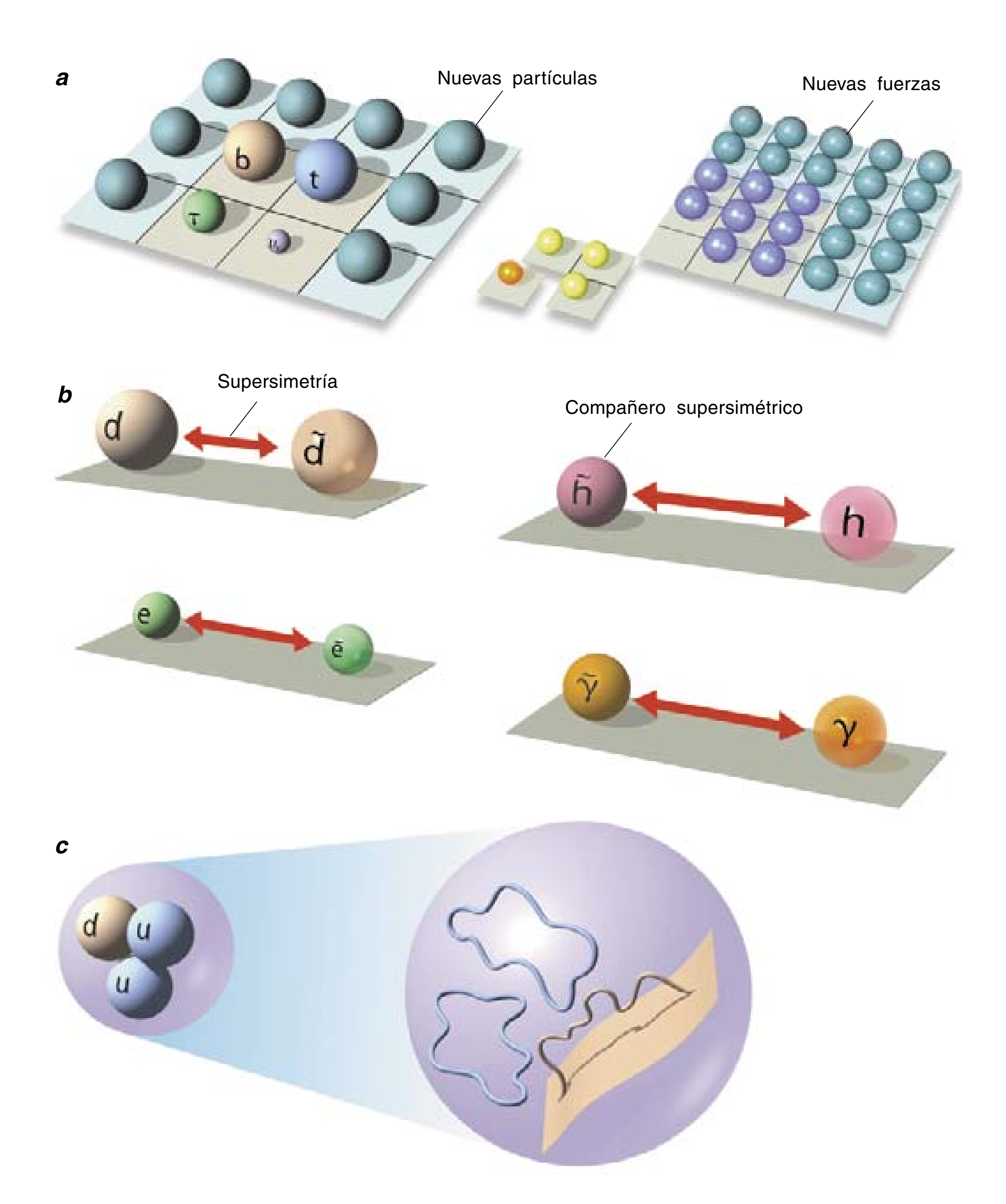
El modelo estándar es una teoría cuántica de campos peculiar. Se trata de una teoría "renormalizable". El origen del adjetivo nos retrotrae a los años cuarenta, cuando se aprendía a aplicar las primeras teorías cuánticas de campos para calcular pequeños cambios en los niveles de energía atómicos. Los físicos descubrieron que los cálculos basados en estas teorías producían cantidades infinitas, un resultado que suele indicar que una teoría es imperfecta o se ha llevado más allá de sus límites de validez. Con el tiempo encontraron una manera de manejar estas cantidades infinitas, mediante una redefinición, o "renormalización", basada en unas pocas constantes físicas, como la carga y la masa del electrón. (La versión más reducida del modelo estándar, con sólo una partícula escalar, utiliza 18 de estas constantes.) Las teorías en las que este procedimiento funcionó se denominaron renormalizables; su estructura era más simple que la de las teorías no renormalizables.



Supresión de interacciones

La estructura renormalizable del modelo estándar ha permitido obtener predicciones cuantitativas de resultados experimentales, cuyo éxito ha confirmado la validez de la teoría. La unión del principio de renormalización y varios principios de simetría del modelo estándar descarta procesos no observados, como la desintegración de protones aislados, y prohíbe que los neutrinos tengan masa. Los físicos dieron en creer que las teorías cuánticas de campos correctas tenían que ser renormalizables, exigencia que se convirtió en guía útil para la formulación del modelo estándar. Por eso resultó altamente perturbadora la aparente imposibilidad, por razones fundamentales, de formular una teoría cuántica renormalizable del campo gravitatorio.

En la actualidad, nuestra perspectiva ha cambiado. Las teorías de la física de partículas presentan un aspecto diferente según la energía de los procesos y reacciones estudiados. Las fuerzas producidas por el intercambio de dos partículas pesadas suelen ser muy débiles a energías menores que sus masas. También se pueden suprimir otros efectos. A bajas energías se obtiene una teoría de campos operativa, en la que tales interacciones son despreciables. Los físicos teóricos se han percatado de que cualquier teoría de campos fundamental coherente con la teoría de la relatividad tendrá el formato de una teoría cuántica de campos renormalizable a bajas energías. Mas, aunque los infinitos todavía se cancelan, estas teorías operativas no evidencian la estructura simple de las teorías



7. ¿Qué viene a continuación? Hay varias posibilidades para la física unificada que se encuentra más allá del modelo estándar. Los modelos tecnicolor (*a*) introducen nuevas interacciones análogas a las fuerzas de "color" que mantienen unidos a los quarks. Acompañando a estas interacciones hay nuevas generaciones de partículas diferentes de las tres generaciones conocidas. La supersimetría (*b*) relaciona los fermiones con los bosones y añade al modelo compañeros supersimétricos de cada partícula conocida. La teoría M y la teoría de cuerdas (*c*) reformulan el modelo entero en términos de nuevas entidades como cuerdas delgadas, bucles y membranas, que a bajas energías se comportan como partículas.

renormalizables en sentido clásico. En ellas aparecen otras interacciones complicadas que, en vez de desaparecer por completo, dejan de tener efecto por debajo de cierta escala de energía característica.

La gravedad es una de las interacciones no renormalizables que se suprimen. Su fuerza (o, mejor dicho, su debilidad) a bajas energías nos permite deducir que su escala fundamental de energías es del orden de los 10^{18} GeV. Otra interacción no renormalizable suprimida haría que el protón fuera inestable, con una vida media del orden de los 10^{31} a los 10^{34} años, demasiado tiempo quizá para que pueda observarse antes del año 2050. Otra interacción no renormalizable suprimida haría que los neutrinos tuvieran pequeñas masas, de unos 10^{-11} GeV aproximadamente. Ya se dispone de pruebas sobre la existencia de masas neutrínicas de este orden de magnitud, que deberían establecerse definitivamente antes del año 2050.

Las observaciones de ese tenor ofrecerán pistas firmes para llegar a la teoría unificada de las fuerzas. Con todo, el descubrimiento de una teoría tal no se alcanzará sin una renovación profunda de los conceptos. Han empezado ya a circular algunas ideas prometedoras. Se han propuesto cinco teorías diferentes sobre cuerdas, entidades unidimensionales cuyos diferentes modos de vibración se materializan a bajas energías en distintos tipos de partículas. Al parecer, explican perfectamente las teorías finitas de la gravitación y otras fuerzas en un espacio-tiempo de diez dimensiones. Cierto es que no vivimos en un espacio de diez dimensiones, pero entra en lo razonable que seis de estas dimensiones estén tan compactas, que no puedan observarse a energías inferiores a los 10^{16} GeV por partícula. En los últimos

años se han ido recabando pruebas de que las cinco teorías de supercuerdas (y también una teoría cuántica de campos en 11 dimensiones) son versiones de una sola teoría fundamental (teoría M), que parten de distintos enfoques. Sin embargo, nadie sabe cómo obtener las ecuaciones de esta teoría.

A extramuros del espacio-tiempo

Esta tarea de unificación presenta dos grandes obstáculos. El primero es nuestra ignorancia de los principios físicos que gobiernan la teoría fundamental. En su construcción de la relatividad general, Einstein se guiaba por un principio deducido de las propiedades de la gravitación: el principio de equivalencia de las fuerzas gravitatorias ante efectos inerciales, como la fuerza centrífuga. El desarrollo del modelo estándar tuvo su motor en otro principio, la simetría de aforo ("gauge"); compendia éste una generalización de una propiedad bien conocida de la electricidad: importan más las diferencias de potencial que los potenciales en sí.

Carecemos de un principio fundamental que gobierne la teoría M. Las diferentes aproximaciones de esta teoría tienen la forma de teorías de cuerdas o teorías de campo en espacio-tiempos de distintas dimensiones, pero parece probable que la teoría fundamental no se formulará en ningún tipo de espacio-tiempo. La teoría cuántica de campos está muy limitada por principios relativos a la naturaleza del espacio-tiempo tetradimensional, que se han incorporado a la teoría de la relatividad especial. La cuestión es cómo obtendremos las ideas necesarias para reformular una teoría fundamental cuando esta teoría tiene que describir un reino donde todas las intuiciones derivadas de la vida en el espacio-tiempo resultan ser inaplicables.

Aunque fuéramos capaces de formular una teoría fundamental, y nos referimos ahora al segundo obstáculo, podríamos ignorar cómo usarla para obtener predicciones que confirmen su validez. La mayoría de las predicciones acertadas del modelo estándar están basadas en la teoría de perturbaciones, un método de cálculo. En mecánica cuántica las frecuencias de los procesos físicos vienen dadas por sumas realizadas sobre todas las secuencias posibles de pasos intermedios. Cuando se utiliza la teoría de perturbaciones se consideran, primero, las etapas intermedias más simples, luego las algo menos simples, y así sucesivamente. Semejante proceder funciona sólo si los pasos más complicados aportan contribuciones cada vez menores, lo que sucede en caso de ser suficientemente débiles las fuerzas involucradas. A veces, una teoría con fuerzas muy intensas es equivalente a otra teoría con intensidades muy débiles, lo que puede resolverse mediante métodos perturbativos. Parece ser ello cierto en determinados pares de las cinco teorías de cuerdas en 10 dimensiones y la teoría de campos en 11 dimensiones. Por desgracia, las fuerzas de la teoría fundamental no son probablemente ni muy intensas ni muy débiles, con la imposibilidad consiguiente de echar mano de la teoría de perturbaciones.

Reconocer la respuesta

Nadie sabe cuándo se resolverán estos problemas. Quizá mañana mismo, en una creación brillante de un joven teórico; tal vez haya que esperar hasta el año 2050 o el 2150. Pero cuando ese día llegue, incluso en el caso de que no podamos realizar experimentos a energías de 10^{16} GeV, ni representar dimensiones más elevadas, será fácil reconocer la veracidad de la teoría unificada fundamental. La prueba consistirá en comprobar si la teoría acierta a explicar los valores experimentales de las constantes físicas del modelo estándar, además de otros efectos injustificables a través de este modelo y que podrían haberse descubierto por entonces.

Cabe que cuando comprendamos por fin el comportamiento de las partículas y fuerzas a energías superiores a los 10^{18} GeV sólo encontremos nuevos misterios, y que la unificación parezca tan lejana como siempre. Permítaseme dudarlo. No hay indicidios de ninguna escala de energías más allá de los 10^{18} GeV; la propia teoría de cuerdas sugiere que carece de sentido hablar de energías superiores.

El descubrimiento de una teoría unificada que describa la naturaleza a todas las energías nos permitiría responder a las preguntas más profundas de la cosmología: ¿tuvo la nube de galaxias en expansión que llamamos "gran explosión" un comienzo definido en el tiempo? ¿Es nuestra "gran explosión" un episodio de un universo mucho mayor, en el que se suceden eternamente pequeñas "grandes explosiones"? Si es así, ¿varían las constantes e incluso las leyes de la naturaleza de un universo a otro?

La unificación no será el fin de la física. Es probable que no ayude a resolver algunos de los problemas pendientes de la física actual, como los fenómenos de la turbulencia o la superconductividad a altas temperaturas. Pero sellará el final de una manera determinada de hacer física: la búsqueda de una teoría unificada que dé cuenta de todos los fenómenos de la naturaleza.

EL AUTOR



STEVEN WEINBERG, premio Nobel en 1979, dirige el grupo de física teórica de la Universidad de Texas en Austin.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

DREAMS OF A FINAL THEORY. Steven Weinberg. Pantheon Books, 1992.

REFLECTIONS ON THE FATE OF SPACETIME. Edward Witten, *Physics Today*, vol. 49, n.º 4, páginas 24-30; abril 1996.

DUALITY, SPACETIME AND QUANTUM MECHANICS. Edward Witten, *Physics Today*, vol. 50, n.º 5, páginas 28-33; mayo 1997.

THE ELEGANT UNIVERSE: SUPERSTRINGS, HIDDEN DIMENSIONS AND THE QUEST FOR THE ULTIMATE THEORY. Brian Green. W.W. Norton, 1999.

Exploración del universo

Compete a los cosmólogos despejar el misterio del nacimiento de nuestro universo. También les incumbe demostrar o rechazar la existencia de otros mundos

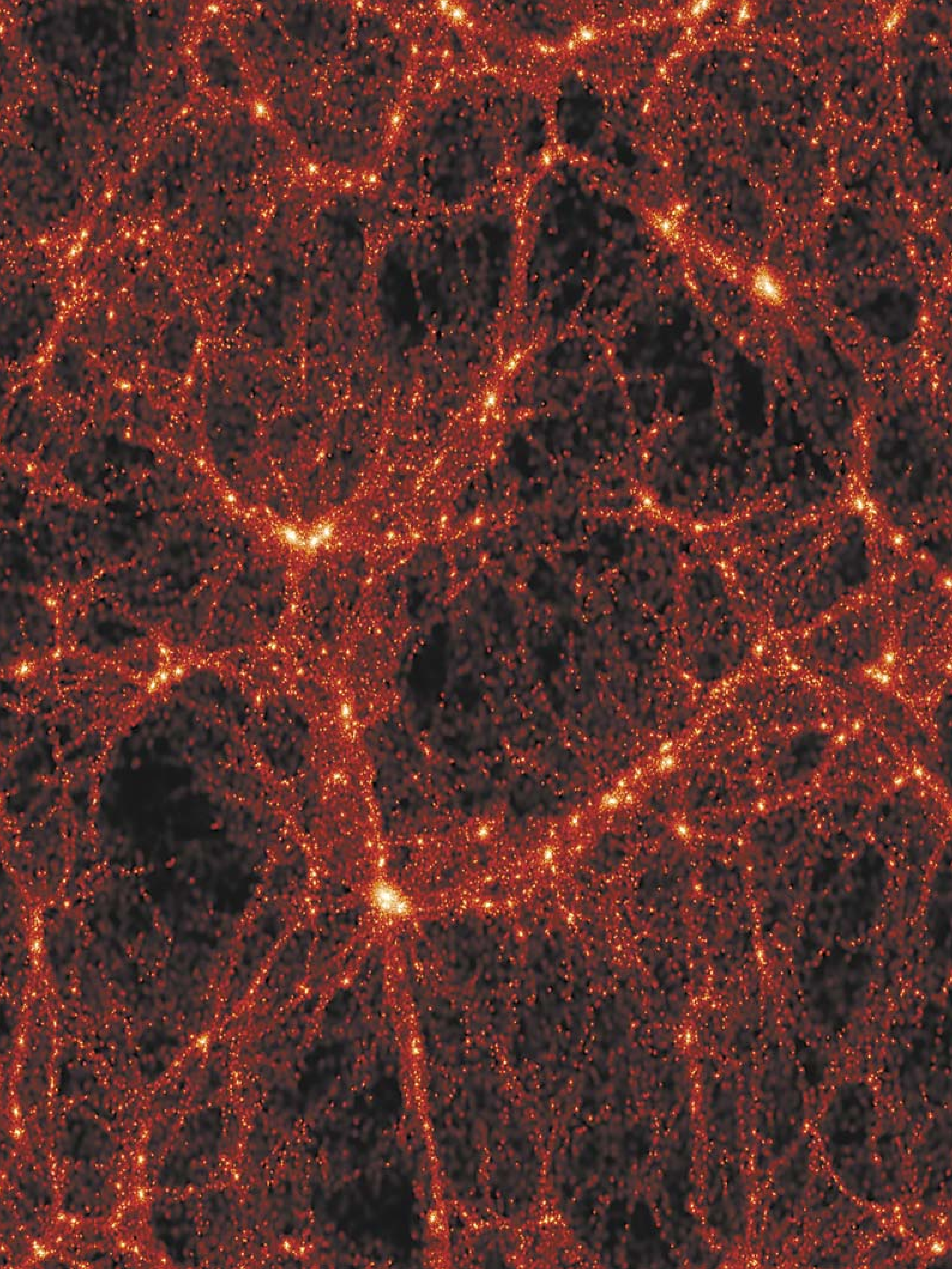
Martin Rees

La exploración cósmica encumbró la ciencia y la técnica del siglo XX. Hasta los años veinte no se supo que la Vía Láctea, con sus cien mil millones de estrellas, era una galaxia más entre millones. Desde entonces se sucedieron los conocimientos empíricos sobre el universo. Podemos ahora situar el sistema solar entero en un contexto evolutivo general y remontar la historia de los átomos que lo constituyen hasta los instantes iniciales de la gran explosión. Si alguna vez descubriésemos inteligencias extraterrestres, compartiríamos con ellas —quizá sería lo único— un interés común por el cosmos del que habríamos nacido todos.

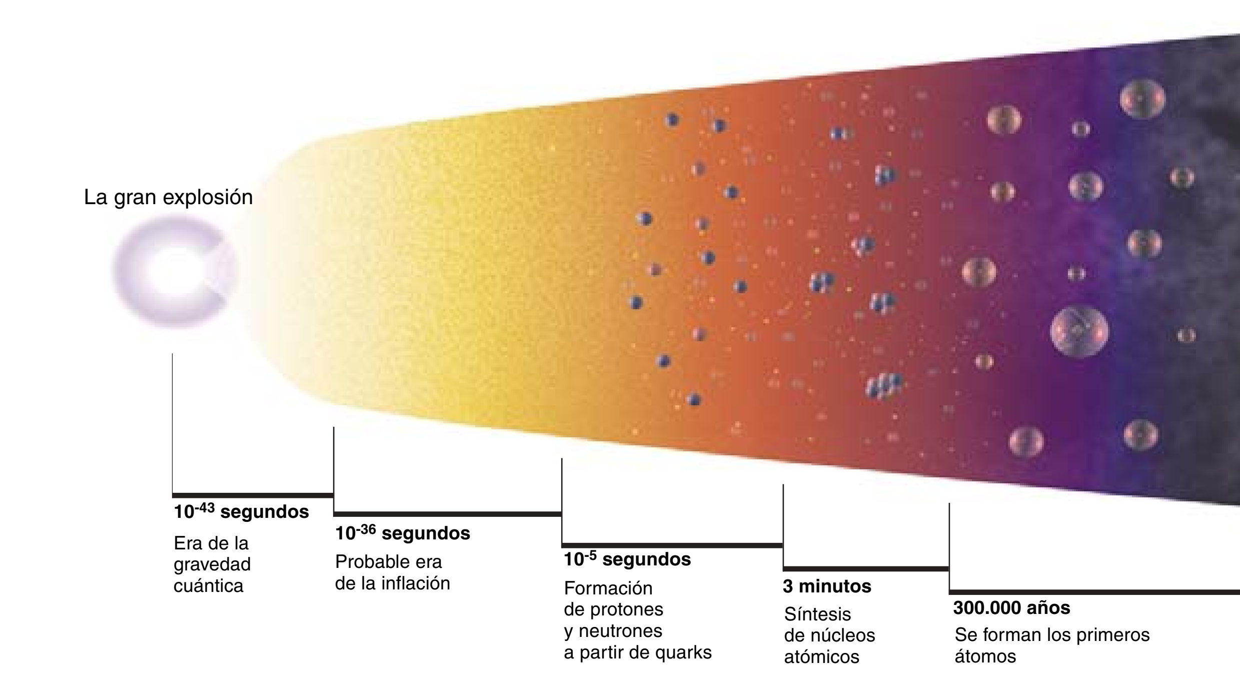
Gracias a la actual generación de observatorios terrestres y orbitales podemos asomarnos al pasado y ver pruebas manifiestas del decurso del universo. Las imágenes del Telescopio Espacial Hubble nos enseñan cómo eran las galaxias en tiempos remotos: bolas de encendido gas difuso punteadas por grandes estrellas azules en celerísima combustión. Estas transmutaron el hidrógeno primigenio de la gran explosión en átomos más pesados; cuando murieron, sembraron sus galaxias con los ladrillos básicos de los planetas y de la vida: carbono, oxígeno, hierro y demás elementos. No fue necesario pulsar 92 botones diferentes para construir todos los elementos de la tabla periódica presentes en la naturaleza. Las galaxias actúan como ecosistemas inmensos, engendran los elementos y reciclan el gas a lo largo de las sucesivas generaciones de estrellas. Nosotros somos polvo de estrellas, hechos de residuos nucleares del combustible que enciende las estrellas.

Se ha progresado en el conocimiento de la era pregaláctica gracias a la radiación de fondo de microondas, que, aunque poco, calienta incluso el espacio intergaláctico. Este rescoldo de la creación nos dice que el universo entero estuvo en un tiempo más caliente que el centro de las estrellas. Con los datos de los laboratorios se puede calcular cuánta fusión nuclear se produjo en los primeros minutos tras la gran explosión. Las proporciones predichas de hidrógeno, deuterio y helio concuerdan con las observaciones astronómicas y corroboran, pues, la teoría de la gran explosión.

1. Para conocer, a escala inmensa, la estructura del universo recurrimos a la simulación operada mediante modelos cosmológicos, ejecutada en un superordenador. En esta simulación, producida por Virgo Consortium, cada partícula representa una galaxia.

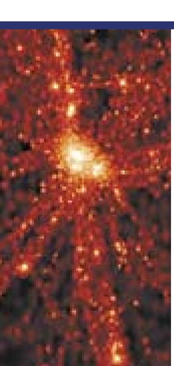


2. Línea cronológica que representa la evolución del universo desde la gran explosión hasta hoy. En el primer instante de la creación —la época de la inflación— el universo se expandió a una velocidad vertiginosa. Pasados unos tres minutos, el plasma de partículas y radiación se enfrió lo bastante como para que se formasen núcleos atómicos simples. Transcurridos otros 300.000 años empezaron a crearse los átomos de hidrógeno y de helio. Las primeras estrellas y galaxias aparecieron unos mil millones de años después. El destino final del universo —la eterna expansión o contraerse de nuevo y sufrir un "gran aplastamiento"— sigue siendo desconocido, pero los indicios con que se cuenta hoy dan a entender que se expandirá para siempre.



A primera vista, la pretensión de desvelar los secretos del universo quizá parezca presuntuosa y prematura. Los cosmólogos, sin embargo, han hecho verdaderos progresos en los últimos años, lo que se comprende si entendemos que la dificultad de una cosa no estriba en el tamaño, sino en su grado de complejidad. Una estrella es más simple que un insecto. El ardiente calor de las estrellas y del universo primitivo obliga a que todo se halle descompuesto en sus constituyentes elementales. Más correosa es la labor de los biólogos, que han de vérselas con la estructura intrincada de árboles, mariposas o cerebros.

El progreso de la cosmología ha definido nuevos misterios y suscitado preguntas que demandan respuesta. ¿Por qué posee nuestro universo la mezcla de ingredientes que observamos? ¿Y cómo, con tan densos comienzos, se ha dilatado hasta tener semejante tamaño? Las respuestas nos obligarán a trascender la física que manejamos para dar cabida a nuevas ideas acerca de la naturaleza del espacio y el tiempo. Si queremos conocer de verdad la historia del universo habrá que descubrir los profundos nexos que unen el reino cósmico de lo grandísimo con el cuántico de lo diminuto.

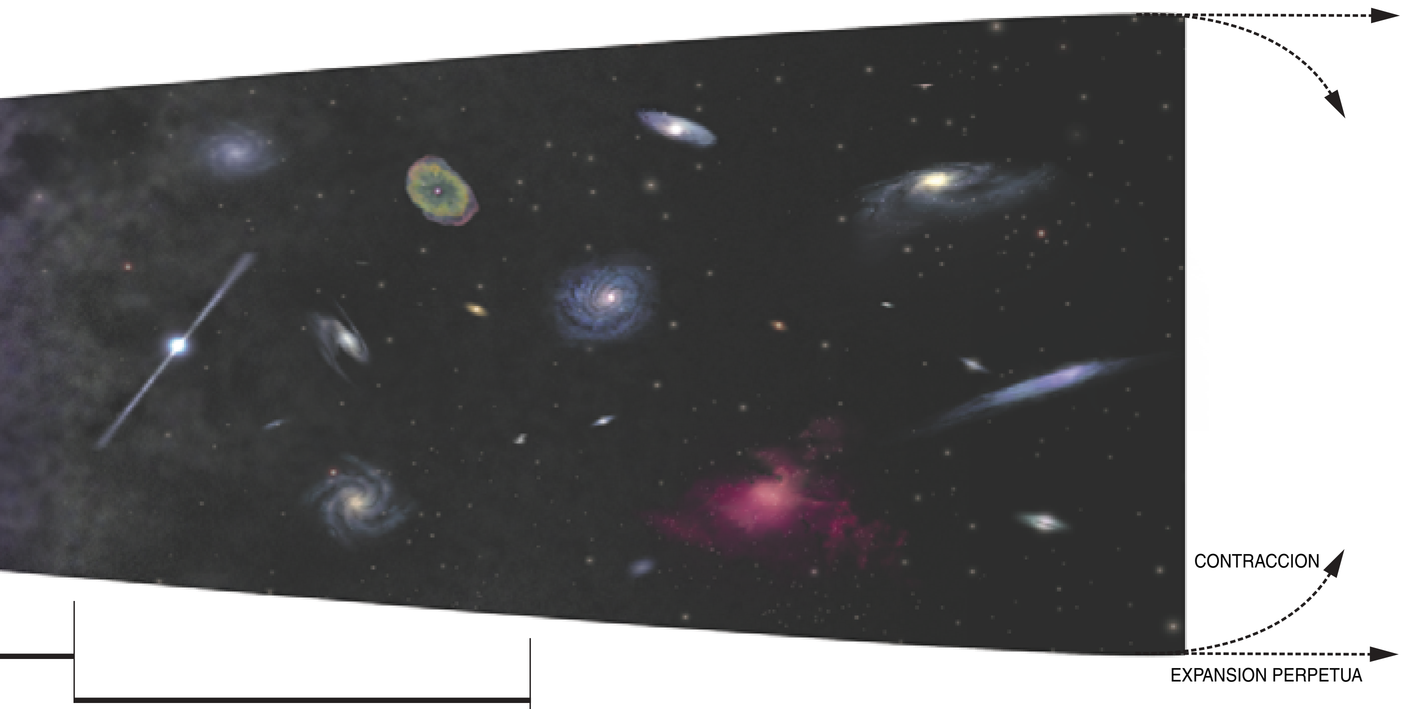


Para los cosmólogos el gran misterio es la serie de sucesos que se produjo menos de un milisegundo después de la gran explosión.

Es embarazoso reconocerlo, pero los astrónomos no saben aún de qué está hecho el universo. Los objetos que emiten una radiación mensurable —estrellas, cuásares o galaxias— constituyen sólo una pequeña fracción de la materia del universo. El grueso de la materia es oscuro e inexplicado. La mayoría de los cosmólogos cree que la materia oscura está compuesta por partículas que interaccionan débilmente, remanentes de la gran explosión. Quizá consista en algo más raro. Sea como sea, las galaxias, las estrellas y los planetas apenas forman la guinda de un cosmos dominado por algo muy distinto. La búsqueda de la materia oscura, sobre todo por medio de experimentos subterráneos muy sensibles, concebidos para detectar partículas subatómicas difíciles de apresar, seguirá a buen ritmo. La recompensa puede ser muy alta: el éxito no sólo nos diría de qué está hecha la parte mayor del universo, sino que es muy posible que nos descubra tipos inéditos de partículas.

No andan seguros los astrónomos sobre la cuantía existente de materia oscura. El destino final del universo —si seguirá expandiéndose indefinidamente o si acabará por cambiar de rumbo y se desplomará— dependerá de la cantidad total de materia oscura que haya y de la gravedad que ejerza. A tenor de los datos disponibles, el universo contiene sólo alrededor de un 30 por ciento de la materia que se necesitaría para detener la expansión. (En la jerga de los cosmólogos, omega —la razón entre la densidad observada y la crítica— es de 0,3.) Las apuestas a favor de un crecimiento perpetuo se han fortalecido aún más hace poco: unas apasionantes observaciones de supernovas lejanas dan a entender que la expansión del universo ni siquiera estaría frenándose, sino acelerándose. Ven en eso algunos astrónomos una prueba de una fuerza repulsiva adicional, que a escalas cósmicas se impone a la gravedad, o, como la llamó Einstein, una constante cosmológica. Las espadas siguen en alto, pero si se confirma la existencia de una fuerza repulsiva los físicos aprenderán algo radicalmente nuevo acerca de la energía latente en el espacio vacío.

También es probable que la investigación se centre en la evolución de la estructura a gran escala del universo. A la pregunta general "¿Qué



ha pasado desde la gran explosión?" podemos contestar lo siguiente: "Desde el principio, la gravedad no ha dejado de amplificar heterogeneidades, construir estructuras y acentuar los contrastes de temperatura, primeros requisitos para que emerja la complejidad que nos rodea y de la que formamos parte." De lo que se trata es de conocer mejor este proceso que arrancó hace 10.000 millones de años, a través de la creación de "universos virtuales" en los ordenadores. Y sin duda, con los años, podremos simular la historia del universo con un realismo cada vez mayor y comparar los resultados con la lección de los telescopios.

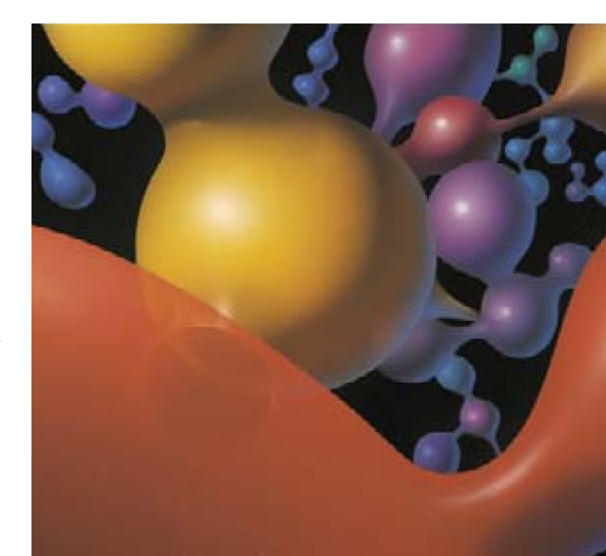
Las cuestiones estructurales han polarizado la atención de los astrónomos desde los tiempos de Isaac Newton, que se preguntaba por qué todos los planetas giraban alrededor del Sol en el mismo sentido y casi en el mismo plano. En su *Optica* de 1704 escribió: "El hado ciego nunca podría haber hecho que todos los planetas se moviesen de una y la misma forma en órbitas concéntricas." Atribuía tan maravillosa uniformidad en el sistema planetario a una providencia divina.

Pero la coplanariedad de los planetas es un resultado natural del origen del sistema solar en un disco rotor de gas y polvo. Hemos llevado las fronteras de nuestro conocimiento a tiempos muy anteriores. Los cosmólogos pueden esbozar las líneas generales de la historia hasta el primerísimo segundo tras la gran explosión. Mas, desde el punto de vista conceptual, nuestra situación no es mucho mejor que la de Newton. Aunque nuestro conocimiento de la cadena causal de acontecimientos se extiende ahora en el tiempo, seguimos tropezando con una barrera, con la que a buen seguro hubo de pechar Newton. Para los cosmólogos el gran misterio es la serie de sucesos que se produjo menos de un milisegundo después de la gran explosión, cuando el universo era mínimo, caliente y denso. Las leyes de la física que nos son familiares no nos ofrecen un camino firme que conduzca hasta la explicación de lo ocurrido en ese período crítico.

Para correr el velo del misterio, primero hay que precisar —mejorando y refinando las observaciones actuales— algunas propiedades del universo cuando sólo tenía un segundo: velocidad de expansión, tamaño de las fluctuaciones de su densidad y proporciones de átomos ordinarios, materia oscura y radiación. Mas para entender por qué nuestro universo se configuró tal y como es, hay que sondear más atrás, hasta la primerísima y mínima fracción de un milisegundo. Empeño este que exige avances importantes en la teoría. Los físicos han de descubrir una manera de ligar la teoría de la relatividad general de Einstein, que gobierna las interacciones a gran escala del universo, con los principios cuánticos que se aplican a distancias muy cortas. Haría falta una teoría unificada para explicar qué sucedió en los cruciales instantes subsiguientes a la gran explosión, cuando el universo entero ocupaba un espacio menor que un átomo.

La astronomía es una disciplina donde la observación es la reina. Eso rige ahora también con la cosmología, a diferencia de lo que pasaba antes de 1965, época de especulación desbocada. La sensibilidad de los dos telescopios Keck, de Mauna Kea, supera en mucho la acuidad de observatorios precedentes y así esos telescopios vislumbrar

3. Según algunos cosmólogos nacen continuamente nuevos universos. Aquí se representa cada uno como una burbuja expansiva que mana de su universo "progenitor". Los cambios de color simbolizan los cambios de las leyes físicas de un universo a otro.





4. Los observatorios lunares ampliarán el alcance de la astronomía. La cara oculta de la Luna constituye un lugar ideal para los telescopios porque carece de atmósfera y sus noches son oscurísimas. (La luz que se refleja en la superficie de la Tierra no llega a la cara oculta porque nunca mira a nuestro planeta.) En la construcción de los instrumentos podrían utilizarse minerales lunares.

objetos más débiles. Con todo no pueden compararse con el Gran Telescopio que se está construyendo en el norte de Chile; cuando esté terminado será el primero de los instrumentos ópticos del mundo. Los astrónomos se han de aprovechar de las posibilidades que ofrecen las nuevas redes de radiotelescopios en tierra y el Observatorio Chandra de rayos X, puesto en órbita el verano de 1999. Así que pasen diez años, la próxima generación de telescopios espaciales llevará la empresa donde no alcanzó el Hubble.

Antes del año 2050 veremos, si las cosas no se tuercen, la construcción de observatorios gigantescos en el espacio o, quizás, en la cara oculta de la Luna. La sensibilidad y el poder de resolución de estas redes sobrepasarán con mucho los de cualquier instrumento ahora en servicio. Los nuevos telescopios apuntarán a planetas de otros sistemas solares y a agujeros negros. Nos ofrecerán también instantáneas de las eras cosmológicas hasta remontarnos a la primera luz, cuando empezaron a condensarse estrellas (o cuásares tal vez) a partir de residuos expandidos procedentes de la gran explosión. Algunos observatorios de ésos podrían incluso medir ondas gravitatorias, facultando a los expertos para sondear las vibraciones del tejido del espacio-tiempo mismo.

La cantidad de datos aportados por tamaño armamentario será tan inmensa, que habrá que automatizar el proceso entero de análisis y descubrimiento. Los astrónomos se concentrarán en las estadísticas, muy procesadas ya, de cada población de objetos que estudien y en encontrar los mejores casos, los planetas de otros sistemas solares, por ejemplo, que más se parezcan a la Tierra. Especial atención se pondrá en los objetos remotos que puedan dar pistas acerca de procesos físicos que no se comprendan bien todavía. Citemos a este propósito los emisores de pulsos de rayos gamma, que lanzan en unos segundos la energía de mil millones de galaxias. El universo vendrá a ser el laboratorio cósmico donde abordar fenómenos irreproducibles en la Tierra.

Otra ventaja de la automación estribará en el acceso a la información. Reservados antaño los datos astronómicos a unos cuantos privilegiados, habrá mapas puntillistas de los cielos a disposición de quien quiera descargarlos en su ordenador. Los aficionados de todo el mundo podrán contrastar sus propias intuiciones, buscar nuevos patrones en los datos y descubrir objetos inusuales.

¿Indicios de un multiverso?

Los cosmólogos creen que el universo es un intrincado tapiz que ha evolucionado a partir de las condiciones iniciales impresas en el primer microsegundo tras la gran explosión. Estructuras y fenómenos complejos han dimanado de leyes físicas simples. Pero unas leyes simples no conducen necesariamente a consecuencias complejas. Piénsese en una situación análoga del campo de las matemáticas fractales: el conjunto de Mandelbrot, patrón con una profundidad estructural infinita, se codifica mediante un breve algoritmo, pero otros algoritmos sencillos, superficialmente similares a ése, dan patrones muy aburridos.

Nuestro universo no estaría estructurado de no haberse expandido a una velocidad peculiar. Si la gran explosión hubiese producido menos fluctuaciones de densidad, el universo habría permanecido oscuro, carente de cualquier tipo de formación, sin estrellas ni galaxias. Y hay otros requisitos previos para la existencia de complejidad. Si nuestro universo tuviese más de tres dimensiones espaciales, los planetas no describirían órbitas alrededor de las estrellas. Si la gravedad fuera mucho más intensa, aplastaría a un organismo vivo del tamaño de un ser humano y las estrellas serían pequeñas, de vida corta. Si las fuerzas nucleares fuesen más débiles en unos cuantos puntos porcentuales, sólo el hidrógeno sería estable y no habría, pues,

tabla periódica, ni química ni vida. Por contra, si las interacciones nucleares fuesen un poco más fuertes, no existiría el hidrógeno.

Algunos sostendrían que este preciso ajuste del universo, tan fino que parece providencial, no debe sorprendernos porque, de no haberse producido, no existiríamos. Cabe otra interpretación: pueden existir muchos universos, pero sólo algunos permiten que aparezcan criaturas como nosotros, que, claro está, nos encontramos en uno de los mundos de ese subconjunto. Las características del universo que parecen deliberadas no tendrían entonces por qué ser motivo de sorpresa alguna.

En esa hipótesis, nuestra gran explosión no sería quizá la única. Se ensancha, pues, nuestra noción de la realidad. La historia entera de nuestro universo se convierte en mero episodio, una faceta nada más, del infinito multiverso. Algunos universos se parecerían al nuestro, pero casi todos habrían "nacido muertos". Se contraerían de nuevo tras una existencia fugaz, o quizá no permitiesen sus leyes la aparición de consecuencias complejas.

Andrei Linde, de la Universidad Stanford, y Alex Vilenkin, de la de Tufts, entre otros, han mostrado ya que ciertos supuestos matemáticos conducen, al menos en teoría, a la creación de un multiverso. Pero estas ideas no saldrán de los suburbios especulativos de la cosmología hasta que no conozcamos de verdad —en vez de recrearnos en conjeturas— la física extrema prevaleciente justo después de la gran explosión. ¿Determinará de manera unívoca la tan esperada teoría unificada las masas de las partículas y las intensidades de las fuerzas básicas? ¿Serán estas propiedades acaso resultados accidentales de cómo se enfrió el universo, manifestaciones secundarias de unas leyes aún más profundas que gobiernen un conjunto entero de universos?

Quizá parezca arcano el tema, pero de cómo haya que considerar las ideas en torno al multiverso dependerá la actitud que tomemos ante determinadas cuestiones controvertidas. Hay teóricos inclinados por un cosmos más simple, que requiere una omega de 1, es decir, por un universo cuya densidad sea justo la necesaria para detener su propia expansión. No les hacen felices las observaciones que sugieren que el universo no es ni de lejos tan denso y, encima, que tiene complicaciones adicionales, como la constante cosmológica. Quizá deberíamos aprender la lección de Johannes Kepler y Galileo Galilei; a estos astrónomos del siglo XVII les perturbó descubrir que las órbitas planetarias eran elípticas. Tenían a los círculos por más simples y bellos. Pero Newton explicó luego todas las órbitas a partir de una sencilla ley universal de la gravedad. Si Galileo hubiese vivido todavía, habría estado encantado de reconciliarse con las elipses.

El paralelismo es obvio. Si un universo poco denso y con una constante cosmológica parece feo, quizá sea sólo por nuestra visión miope. Así como la Tierra sigue una de las pocas órbitas keplerianas alrededor del Sol que la hacen habitable, cabría la posibilidad de que nuestro universo fuera uno de los pocos habitables de un conjunto mayor.

Un desafío para el nuevo milenio

El acervo del saber avanza hoy en tres grandes frentes: lo muy grande, lo muy pequeño y lo muy complejo. La cosmología abarca los tres. En los años venideros los investigadores centrarán sus esfuerzos en determinar las constantes universales básicas, como omega, y en descubrir qué sea en realidad la materia oscura. Creo que hay muchas posibilidades de que se hayan satisfecho ambos objetivos de aquí a diez años. Puede que todo encaje en el marco teórico ordinario y consigamos determinar no sólo la abundancia relativa de los átomos corrientes y de la materia oscura del universo, sino también la constante cosmológica y las fluctuaciones primordiales de la densidad. Si es así, le habremos tomado la medida al universo tal y como, en los últimos siglos, aprendimos el tamaño y la forma de la Tierra y el Sol. Pero a lo mejor resulta que el universo es demasiado complicado y no cabe en el marco estándar. Algunos dirían de la primera posibilidad que es optimista; ¡otros preferirían vivir en un universo más complicado y que plantee más dificultades!

Los teóricos, además, han de elucidar la física exótica de los primeros gemidos del universo. Si tienen suerte, sabremos si hay muchos universos y qué características del nuestro son sólo meras contingencias y no consecuencias necesarias de leyes más profundas. Pero nuestro conocimiento tendrá límites. Aunque los físicos descubran, algún día, una teoría unificada sobre la realidad física, nunca sabrán qué insufla fuego a sus ecuaciones y las materializa en un cosmos real.

La cosmología no es sólo una ciencia fundamental; es también la ciencia ambiental que abarca la mayor de las escalas. ¿Cómo evolucionó una bola de fuego amorfa, muy caliente, a lo largo de diez a quince mil millones de años hasta convertirse en un cosmos complejo, lleno de galaxias, estrellas y planetas? ¿Cómo se juntan los átomos —aquí en la Tierra y quizás en otros mundos— para constituir seres vivos lo bastante complicados como para pensar en su propio origen? Estas preguntas son un desafío para el nuevo milenio. Quién sabe si en pos de sus respuestas el hombre caminará siempre.

EL AUTOR



MARTIN REES ocupa en la Universidad de Cambridge la cátedra de investigación que lleva el nombre de la Regia Sociedad. Se le ha concedido el título honorario de Astrónomo Real. Goza de reconocido prestigio en el dominio de los agujeros negros, la formación de galaxias y la astrofísica de altas energías.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS ENCYCLOPEDIA. Dirigido por Stephen P. Maran. Van Nostrand Reinhold, 1992.

PLANET QUEST: THE EPIC DISCOVERY OF ALIEN SOLAR SYSTEMS. Ken Croswell. Free Press, 1997.

THE LITTLE BOOK OF THE BIG BANG: A COSMIC PRIMER. Craig J. Hogan. Copernicus, 1998.

PERFILES

Julie Lewis

MARGARET D. LOWMAN: En el dosel del trópico

Subida a una encina, Margaret D. Lowman inspecciona, por arriba, los penachos de las palmeras y de otras plantas tropicales. Entre las ramas, bajando la mirada, contempla retazos del golfo de Florida. Para ella, trepar hasta la plataforma que se ha preparado en el dosel no supuso esfuerzo alguno. Pese a la sofocante humedad, ni una gota de sudor perla su frente. Aspira el aire fresco de la mañana y rezuma júbilo. Más tarde, esta botánica de 45 años confiesa que le gusta más bajar que subirse. "El hombre no está hecho para vivir en los árboles como un mono", declara. Extraña observación viniendo de ella. Nadie como esta mujer para disputarle la partida a los simios.

Miles de veces ha subido a esas alturas en su anhelo de conocer mejor uno de los últimos parajes ignotos de la tierra: el dosel de la pluviselva. La dificultad de ascender hasta la bóveda ha preservado su condición de territorio desconocido donde los haya. Así, hasta que Lowman y otros naturalistas intrépidos idearon la forma de moverse en ese medio con soltura. Cuando no utiliza cuerdas para auparse a las copas de los árboles, se suspende de un globo aerostático o se vale de una grúa. En pleno embarazo no se arredró y se introdujo en un recolector de cerezas para continuar la investigación, cuyo desarrollo le ha llevado a Camerún, Perú, Belice, Samoa, Panamá y Australia.

Hay dibujos infantiles que decoran, con un dardo de cerbatana envenenado del Amazonas, la pared del despacho que ocupa en los Jardines Botánicos Marie Selby, una exuberante parcela ubicada en los terrenos de la antigua mansión de un petrolero de la Texaco en Sarasota (Florida). Allí es directora de investigación. Sobre su mesa se abre un ejemplar de las reseñas bibliográficas del *New York Times*, que acogió calurosamente su autobiografía *Life in the Treetops*.



1. Encaramándose a los árboles, Margaret D. Lowman ha contribuido a innovar las técnicas para mejor conocer las bóvedas arbóreas

Aunque su trabajo exige esfuerzo físico, la menuda Lowman no parece especialmente fuerte. Pero su exigua constitución esconde un manantial de energía y entusiasmo. Siempre está en primera línea. Acepto la invitación y trepamos hasta la atalaya del jardín. Mientras me abrocho el arnés de seguridad, me comenta que las normas de protección es cosa reciente, todavía sin concluir. Sólo ha sufrido una leve caída en sus 20 años de profesión, pero a varios amigos debieron "coserles las entrañas para ponérselas en su sitio" tras un accidente, dice.

Lowman comenzó su actividad arbórea en Australia a finales de los setenta. Nacida en el estado de Nueva York, llegó a la Universidad de Sydney en 1978 dispuesta a investigar algún aspecto de la pluviselva en torno al cual enhebrar la tesis de doctorado. Pero en Sydney la pluviselva no había despertado interés alguno. Nadie del departamento, incluido el que tendría que ser su director de tesis, se había asomado a ese ecosistema. "Creo que me admitió por hacerme un favor. Le había conocido en Inglaterra durante un año sabático, y le hablé con mucho entusiasmo sobre el estudio de la pluviselva", recuerda. En su ingenuidad, no cayó en que la Australia tropical está a 1000 kilómetros de Sydney.

Al principio Lowman se propuso estudiar las mariposas. Cuando el director le insinuó cuán esquivas podían llegar a ser, volvió la mirada hacia las hojas. También éstas tenían su inconveniente; para estudiarlas debería trepar. Buscó mil maneras de paliar el ascenso, sin descartar la idea de domesticar un mono. Ninguna resultó. Había que subir una misma hasta la copa. Por entonces no había en Sydney ni tiendas de montañismo ni material. Acudió a los espeleólogos de la universidad en busca de ayuda sobre técnicas y material de escalada. Siguiendo sus

instrucciones, se fabricó su propio arnés con cinturones de seguridad de automóvil. Con el mejor estilo de los madereros lanzó las cuerdas y trepó a su primer árbol.

"Al día siguiente sentía las piernas doloridas, por culpa de las contracciones incorrectas de todos los músculos. Creía que abrazándome al árbol iba a salvar mi vida." Ya podía empezar a estudiar el crecimiento de las hojas de la pluviselva y la incidencia sobre ellas de los herbívoros. Llegó a un primer resultado: cuestionar la idea de que tales hojas sólo viven entre uno y tres años. De hecho, aunque las hojas de la parte más soleada de la copa duran más o menos ese tiempo, las hojas de las zonas umbrosas inferiores pueden llegar a vivir 15 años. Tales hallazgos desafiaban la doctrina del crecimiento de las hojas, fundada en observaciones realizadas en bosques templados, y evidenciaban la complejidad de la pluviselva en comparación con otros tipos de bosque.

En 1983, se la requirió en la Australia rural. Los eucaliptos se secaban y morían en cantidades aterradoras. Registrada su aparición en Australia en 1978, la patología había alcanzado proporciones de epidemia a principios de los años ochenta en las regiones agrícolas del interior de Sydney, y constituía una grave amenaza económica y ecológica contra los asentamientos. Tras tres años de trabajo, de subir una y otra vez, Lowman y Harold F. Heatwole señalaron al escarabajo común como causa inmediata de la afección, exonerando así a los koalas nativos de cualquier culpa. La introducción de ganado y gramíneas foráneas había dado lugar a un brote de escarabajos. Los árboles debilitados por la sequía y la erosión del suelo no pudieron soportar el violento ataque de los insectos.

Para cuando Lowman identificó el agente responsable, su matrimonio se tambaleaba. Se había casado con un ganadero del lugar, y tras el nacimiento de sus dos hijos, el marido y la familia política querían que se dedicara por entero a las tareas domésticas tradicionales de una explotación ganadera de 2500 hectáreas. Eran los días también en que los ecologistas luchaban por salvar la pluviselva australiana, y se necesitaba su competencia en la materia. En un esfuerzo por conjugar maternidad y ciencia, empezó a llevarse a sus hijos a la pluviselva. Pero tras ocho años en lugares deshabitados, tratando de trabajar sin el apoyo de su familia, regresó a los Estados Unidos con sus hijos, cerca de sus padres y su hermano.



2. La manera favorita de Lowman para llegar hasta las copas de los árboles es colgada de un dirigible

Desde entonces, no ha dejado de promover y facilitar el acceso al dosel tropical. En 1991 trabajó con un equipo francés que utilizaba un globo aerostático para suspender una plataforma inflable sobre la jungla de Camerún. Es su manera favorita para llegar a la bóveda, "como si te lanzaras de un trampolín". Intervino en la construcción de la primera pista arbórea en Australia y en la primera norteamericana. Hoy esos senderos aéreos están por todo el mundo, para provecho de la ciencia y disfrute de muchos afortunados.

Cuando se adentraba en la pluviselva con sus hijos en campañas de trabajo, les enseñaba las reglas del medio; una importante, no tocar las arañas. Ideó un sistema de apretones de manos para que supieran cuándo no debían molestar al científico en su investigación. Un suave apretón, por ejemplo, significaba "no hables, conténtate con escuchar". "Mis colegas estaban absolutamente impresionados con lo buenos que eran mis hijos", dice. "Ahora mis colegas varones me llaman por teléfono para decirme: Me quiero llevar a mi hijo a Costa Rica, ¿qué tengo que hacer?"

Estos últimos años Lowman ha venido aportando su inagotable energía a la asociación entre los que trabajan en el ecosistema de la bóveda. Ha organizando conferencias anuales, inyectando "un gran dinamismo en esos profesionales hasta ahora dispersos", observa Terry Erwin, entomólogo de la Institución Smithsoniana. En 1995 Lowman coordinó, junto con Nalini M. Nadkarni, del Evergreen College, el primer libro para consolidar los estudios sobre la bóveda. El número de personas involucradas en el nuevo campo abierto no deja de crecer.

Su afán se centra ahora en la conservación de la pluviselva. "No basta con que los científicos conozcan las cosas y las compartan entre sí en las revistas científicas." Lowman cree que descubrir las riquezas médicas de la pluviselva también podría contribuir a su preservación. "Me parece que probablemente estamos perdiendo el tren con algunas de esas medicinas naturales y algunos de esos usos tribales que sólo los nativos conocen", aventura. Espera que los botánicos busquen financiación en asociación con las compañías farmacéuticas para indagar sobre las posibilidades medicinales de las plantas selváticas.

Sin embargo, los indígenas tienen sus derechos a la propiedad de los productos, sostiene. "No sólo habitan en la selva, sino que también han pasado muchas generaciones desarrollando los usos de estas plantas que ahora estamos descubriendo nosotros para la medicina", explica. "En los años venideros, esperemos que se den asociaciones que beneficien a las industrias farmacéuticas y a los lugareños, todo lo cual redundará a la postre en la conservación de la pluviselva."

Los premios Nobel de 1999

Exposiciones de la física, la química y la medicina premiadas con el más prestigioso galardón del mundo, y además un vistazo a los premios de la paz, ganado por una organización de médicos, y de economía

FISICA

Base matemática

GERARDUS 'T HOOFT
Universidad de Utrecht

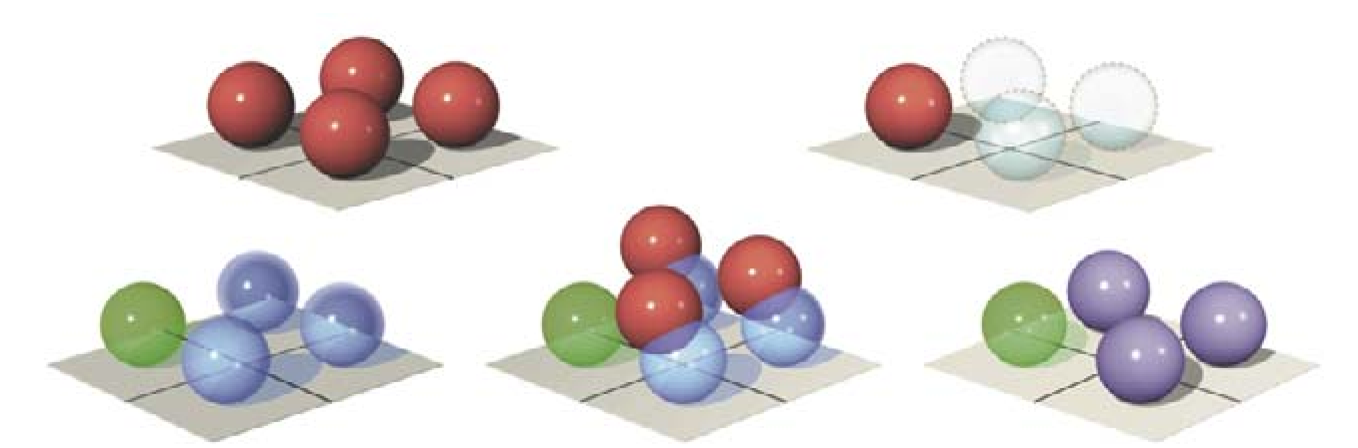
MARTINUS J. G. VELTMAN
Universidad de Michigan (emérito)

Una teoría elegante y convincente no servirá para nada si sus predicciones son erróneas o, aún peor, carecen de sentido. Los físicos de partículas elementales, en su empeño por aplicar la teoría cuántica de campos a los experimentos, han tenido que enfrentarse a esos problemas a lo largo del siglo XX, a intervalos regulares.

La teoría cuántica de campos describe con un mismo lenguaje partículas, campos y fuerzas, y produce así ecuaciones inabordables que se resuelven por lo normal mediante aproximaciones sucesivas. Pero, ay, al aplicar este método al electromagnetismo se generaban unos términos infinitos que no eran admisibles. En los años cuarenta la "renormalización" solucionó este problema reuniendo infinitos y absorbiéndolos en un pequeño número de parámetros finitos. Con esta forma de proceder, las aproximaciones arrojan predicciones que concuerdan con los experimentos hasta el décimo lugar decimal; no las hay más precisas en toda la ciencia.

A finales de los años sesenta la atención se centró en la interacción débil, causa de la desintegración radiactiva beta y esencial para las reacciones nucleares que crean la energía del Sol. Mientras que en el electromagnetismo interviene una partícula sin masa (el fotón), en la fuerza débil actúan partículas de interacción pesadas. Por desgracia, parecía que la renormalización fracasaba con las diversas teorías propuestas que incluían esas partículas dotadas con masa, lo que proyectaba graves dudas sobre el programa entero. Pero Martinus J. G. Veltman emprendió un análisis sistemático de las dificultades matemáticas y elaboró un programa de ordenador que se encargaba del álgebra. Gerardus 't Hooft se incorporó al proyecto en 1969 como estudiante de doctorado.

Para julio de 1971 't Hooft había logrado demostrar que una teoría electrodébil determinada podía ser renormalizada gracias a uno de sus rasgos fundamentales: las partículas de la interacción débil adquirían su masa por medio de un proceso denominado rotura espontánea de la simetría, en el que participaban unas partículas nuevas, "escalares" (*véase la figura*). Veltman y 't Hooft introdujeron además una técnica nueva para manejar los infinitos de esas teorías. Este método de regularización dimensional, que modifica temporalmente en un cálculo el número de dimensiones espaciales, tuvo una importancia capital en el desarrollo de algunos detalles de la prueba de la renormalización, y desde entonces ha sido común su uso.



La teoría cuántica de las interacciones electrodébiles tiene como punto de partida (1) *cuatro partículas de interacción carentes de masa, el fotón, las* W^+ *y* W^-*, cargadas, y la* Z^0*, neutra. Los experimentos indican que las* W *y la* Z *tienen masa, pero si se incorpora "a mano" esa masa a la teoría se destruye su coherencia matemática. Por eso se añaden* (rojo) *cuatro partículas escalares (técnicamente, conservan la simetría gauge, o de aforo, de las ecuaciones, cosa que no sucede cuando las masas se ponen a mano). Las* W *y* Z *se "comen" tres de las escalares* (2)*, lo que les da masa y deja detrás tres "fantasmas" y una partícula escalar, a partir de ahí llamada partícula de Higgs* (3)*. Los fantasmas, como conviene a su evocador nombre, sólo aparecen en estados intermedios efímeros. Veltman y 't Hooft desarrollaron la primera técnica matemática coherente que derivó de esta teoría predicciones con sentido experimental*

El resultado impulsó a los teóricos y a los experimentadores a centrarse en esa teoría electrodébil renormalizable, que se convirtió en parte central del modelo estándar. Gracias a las técnicas concebidas por 't Hooft y Veltman se hicieron predicciones detalladas de las propiedades de las partículas *W* y *Z* y predicciones aproximadas relativas al quark cima; unas y otras han sido confirmadas por los experimentos. Dos grandes problemas quedan por resolver en esta línea de trabajo: a los experimentadores les toca la observación directa de la partícula de Higgs; a los teóricos, la formulación de una teoría de la gravedad cuántica igualmente renormalizable y resoluble por medio del cálculo.

QUIMICA

La química del femtosegundo

AHMED H. ZEWAIL
Instituto de Tecnología de California

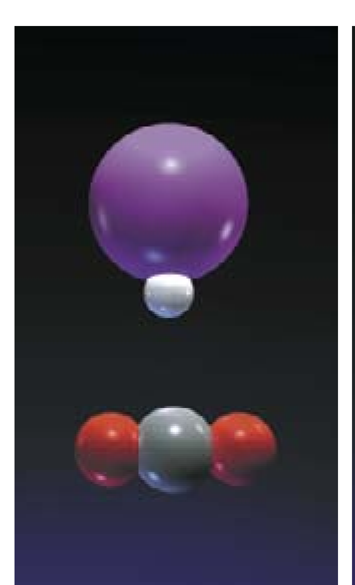
No hay químico que no sueñe en observar el curso sutil de las reacciones. Si se alcanzara esa facultad, podríamos saber por qué se producen unas reacciones y otras no, por qué dependen de la temperatura la velocidad y el rendimiento de una reacción química, amén de otras cuestiones no menos básicas. Pero contra ese afán se opone la velocidad extrema de las reacciones. En lo que dura un parpadeo, moléculas de yodo y benceno pueden reaccionar y formar yodo atómico y otros productos, más de 333.000 millones de veces.

A finales de los setenta, Ahmed H. Zewail comenzó a proyectar pulsos cortos de láser sobre moléculas y átomos reaccionantes. Deseaba conocer la dinámica en tiempo real. Durante la reacción, se dan estados de transición que presentan moléculas o átomos distintos de los reactivos o de los productos. Estos átomos y moléculas absorben cualquier luz que incida sobre ellos, o la reirradian, y alteran el espectro de la luz incidente a unas frecuencias específicas.

Los estados de transición duran de 10 a 100 femtosegundos; por consiguiente, serán cortísimos los pulsos de láser necesarios para sondearlos. A mediados de los ochenta se desarrollaron los modelos de láser capaces de emitir semejantes pulsos; no se les escaparon al grupo de Zewail las posibilidades que encerraban. En 1987, mediante el empleo de cianuro de yodo (ICN), observaron los primeros detalles de la disociación de moléculas; contemplaron la partición de la molécula en yodo y cianuro, e incluso el mutuo alejamiento de los fragmentos.

En un experimento típico, Zewail inicia una reacción con un pulso estimulador que aporta energía a los reactivos. Femtosegundos después, el primer pulso sonda incide en las moléculas; a éste le siguen muchos miles más, cada 10 femtosegundos aproximadamente, durante el curso de la reacción. Los cambios operados en el espectro de cada pulso sonda revela el estado de los enlaces químicos, así como los estados de excitación y el movimiento de los átomos y las moléculas. (Para un estudio más amplio, véase el artículo de Zewail "La formación de las moléculas", *Investigación y Ciencia*, febrero de 1991). Se emplea ahora la técnica de Zewail para llegar a una comprensión más fina de la catálisis, la fotosíntesis y la transición molecular estimulada por luz que se produce en los bastoncillos de la retina cuando el ojo detecta fotones.

Zewail confiesa que "nuestro último esfuerzo se ha puesto en el desentrañamiento de las estructuras moleculares de los sistemas biológicos en tiempo real: las transformaciones que experimentan de una configuración a otra". En un primer tanteo, su grupo siguió la dinámica de la reacción en la que se obtiene etileno a partir de etano. A largo plazo, se proponen abordar la dinámica de las moléculas de proteínas. Zewail cree que, andando el tiempo, se podrán alterar las moléculas empleando de forma precisa pulsos fijados estratégicamente.






La reacción entre yoduro de hidrógeno y dióxido de carbono para crear monóxido de carbono, radical hidroxilo y yodo fue registrada por el grupo de Ahmed H. Zewail a finales de los ochenta. Mediante el uso de pulsos de láser infinitésimos siguieron el curso de los acontecimientos (1-4) *y los movimientos de cada molécula y átomo*

FISIOLOGIA O MEDICINA

El código postal celular

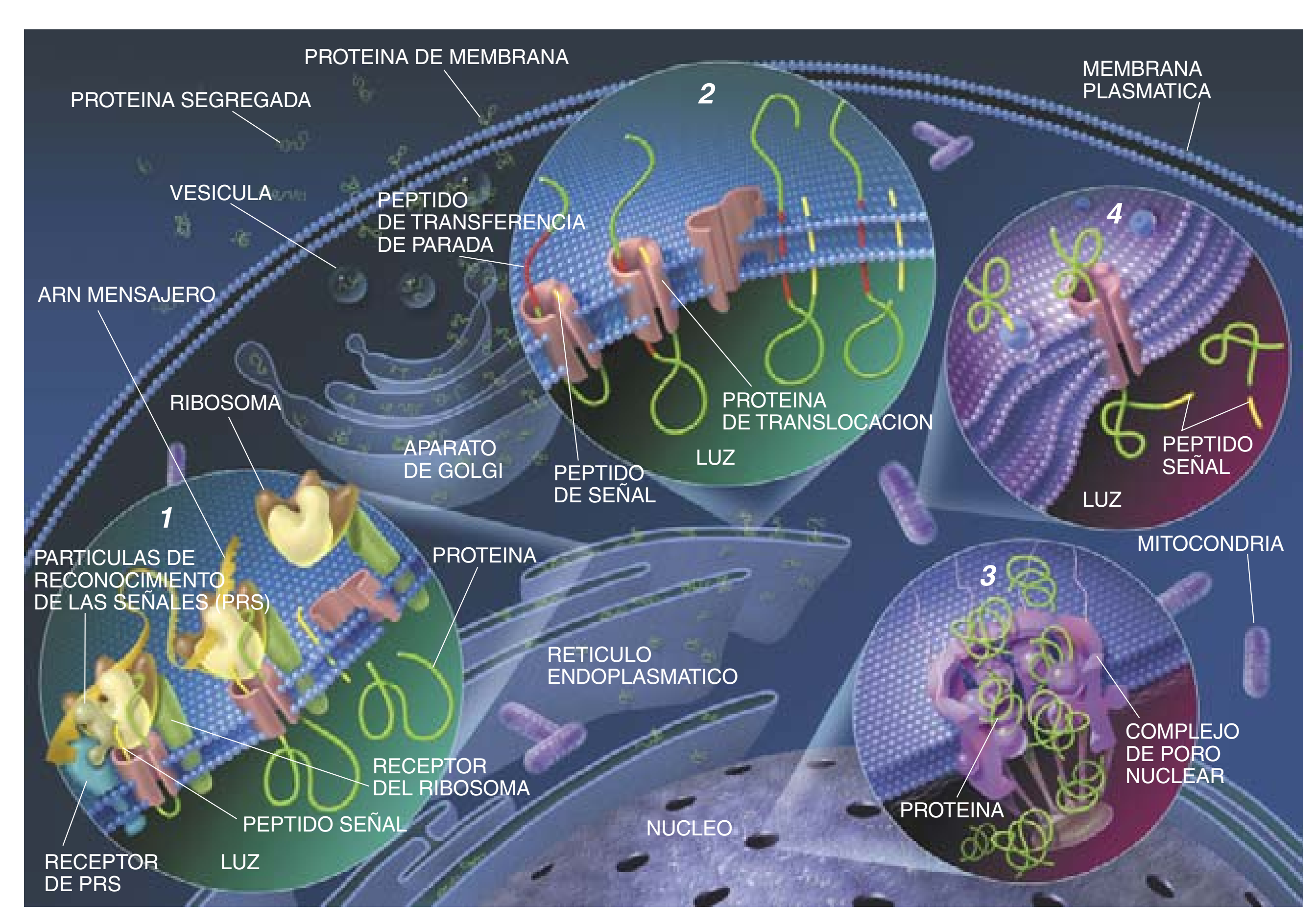
GÜNTER BLOBEL
Instituto Howard Hughes y Universidad Rockefeller de Nueva York

Si el agua no se mezcla con el aceite, ¿cómo pueden las proteínas —moléculas hidrófilas— atravesar las membranas intracelulares, barreras lipídicas que dividen la célula en compartimentos? En búsqueda de una respuesta Günter Blobel inició una dilatada investigación que coronó con el premio Nobel de medicina en 1999.

La primera clave le llegó en 1971. Blobel trabajaba entonces en el laboratorio de George Palade de la Universidad Rockefeller. Blobel y David Sabatini propusieron que cada proteína recién sintetizada poseía un tramo corto —un péptido señal— en un extremo, gracias al cual atravesaba el medio lipídico de las membranas.

Con los años Blobel fue desarrollando la hipótesis de la señal, por un doble camino: mediante el discernimiento del proceso por el cual opera la translocación y mediante el descubrimiento de que los péptidos señal sirven también de "códigos postales" para encauzar las nuevas proteínas a sus destinos en el interior celular, tal como se muestra en la ilustración. El proceso es universal, vale decir, lo encontramos en las células vegetales, los animales y en las levaduras.

Muchas enfermedades graves —como la fibrosis quística y la hipercolesterolemia familiar, una alteración genética que conduce a niveles de colesterol en sangre muy elevados— se producen cuando falla el sistema de transporte de proteínas. Los hallazgos de Blobel allanan el camino a una mejor comprensión de las causas y de los tratamientos potenciales de estos trastornos.



Las proteínas atraviesan las membranas de la célula por varios puntos. Las proteínas que se destinan a la secreción se desenrollan de los ribosomas a medida que se sintetizan (1) y entran en el retículo endoplasmático. Ciertas secuencias cortas, los péptidos señal, ayudan a dirigir los ribosomas hacia el retículo endoplasmático mediante el engarce en partículas de reconocimiento de la señal (PRS), que se unen presto a receptores de PRS. Los péptidos señal se desprenden en cuanto las proteínas se han translocado a través del retículo endoplasmático. Las proteínas se empaquetan en vesículas, que cursan por el aparato de Golgi y se fusionan con la membrana celular para vaciar sus contenidos. Los receptores que reciben mensajes bioquímicos provenientes de otras células conocen una vía similar (2). Además de un péptido señal, las proteínas transmembrana también poseen un péptido de "parada de transporte" que las mantiene engarzadas a las membranas. Cuando las vesículas que transportan las proteínas proceden hacia la membrana plasmática y se fusionan con ella, las proteínas se integran en la membrana.
Un tipo distinto de péptido señal permite que las proteínas que actúan en el núcleo (3) accedan a través de complejos de poros nucleares. Otros péptidos señal aseguran que las proteínas que cumplen su misión en las mitocondrias (4) lleguen a su lugar de destino en el interior celular

ECONOMIA

El padrino del euro

ROBERT A. MUNDELL
Universidad de Columbia

Refiriéndose a Robert A. Mundell, ganador del premio Nobel de economía en 1999, afirma la Real Academia Sueca de Ciencias que "sus contribuciones más importantes las hizo en los años sesenta". Pero sus especiales observaciones sobre el comercio internacional, los tipos de cambio y las ventajas de una moneda común no podrían ser más oportunas en esta época de la globalización.

Perteneciendo Mundell al claustro de la Universidad de Columbia, en los años sesenta trabajaba en el Fondo Monetario Internacional y en la Universidad de Chicago. Por aquel entonces desarrolló un famoso modelo de comercio internacional, el llamado 'modelo Mundell-Fleming'. (Marcus Fleming, economista del Fondo, murió en 1976.)

En la elaboración conjunta del modelo, Mundell se interesó por las consecuencias del comercio exterior y por el movimiento de capitales a través de las fronteras nacionales. Sus investigaciones demostraron que los tipos de cambio entre las monedas influían en la eficacia de la política monetaria de un país (reserva disponible y variaciones de los tipos de interés) y en fiscalidad (sistema de impuestos y medidas presupuestarias). Según el modelo Mundell-Fleming, con un tipo de cambio fijo, las variaciones de las políticas monetarias influirían poco en la economía de una nación, pero las políticas fiscales serían determinantes. Y ocurriría lo contrario con un tipo de cambio flotante.

En la actualidad, la mayoría de los países operan con un tipo de cambio flotante y con libertad de movimientos de capitales a través de las fronteras, por lo que tienden a predominar las políticas monetarias. No era esa la situación en los años sesenta, cuando la mayoría de los países (a excepción de EE.UU. y Canadá) limitaban el flujo de capital a través de las fronteras, y los gobiernos no tomaban en cuenta la economía internacional a la hora de trazar sus planes nacionales.

También por entonces desarrolló Mundell la idea de las "zonas de moneda óptima": formadas por varios países que, en pro de una moneda común, renunciasen a seguir teniendo sus distintas monedas nacionales. La Unión Europea ha adoptado recientemente una unidad monetaria común, el 'euro'; pues bien, Mundell se había referido ya a sí mismo como "padrino del euro". Su libro de 1968, *International Economics*, se encuentra en http://www.columbia.edu/~ram 15/ietoc.html en la World Wide Web.

PAZ

Recetas de paz

MEDICOS SIN FRONTERAS

Para muchos de los enfermos y lisiados del mundo, en países empobrecidos y con frecuencia devastados por conflictos bélicos, el único acceso a los cuidados sanitarios se lo proporciona la organización Médicos Sin Fronteras. Cuenta ésta con más de 2000 voluntarios, que ejercen la medicina en 80 países, 20 por lo menos de los cuales son escenarios de crueles guerras. El comité de los premios Nobel ha reconocido los méritos de Médicos Sin Fronteras dando a tan humanitaria institución, en 1999, el premio Nobel de la paz.

En 1971, un grupo de médicos franceses, la mayoría de los cuales habían trabajado para el Comité Internacional de la Cruz Roja, decidieron separarse de esta organización (cuyo fundador obtuvo en 1901 el Nobel de la paz). Su idea era crear un organismo civil no gubernamental especialmente dedicado a la asistencia médica en casos urgentes y también a denunciar a los individuos o gobiernos responsables de las precarias condiciones en que muchos médicos ejercían su labor. Este enfoque contrastaba mucho con el de otras instituciones que, como la Cruz Roja, siempre han procurado mantenerse neutrales en los asuntos políticos y diplomáticos.

En sus primeros años, la organización Médicos Sin Fronteras prestó asistencia en Nicaragua después del terremoto de 1972, y en Honduras, en 1974, después del huracán Fifi. En 1975, fue a Vietnam, desempeñando allí su primera misión en zona de guerra. Durante los noventa, la organización ha intervenido asistiendo, entre otros, a los kurdos, a los africanos de la República Democrática del Congo, del Sudán y de Sierra Leona, y a muchos habitantes de Honduras, de Kosovo, de Chechenia y de Afganistán.



Un voluntario de la organización Médicos Sin Fronteras, galardonada, atendiendo a los enfermos en una clínica de Liberia

Muchas de las enfermedades y lesiones que ven los Médicos Sin Fronteras no pueden tratarlas apropiadamente por no disponer de suficientes medicinas e instrumental, ni de acceso a los mismos. En un informe de 1999, los voluntarios hacen saber que en ciertos hospitales de Siberia hay pacientes que mueren porque los médicos no disponen de las más recientes combinaciones de antibióticos necesarias para curar formas de tuberculosis resistentes a los fármacos habituales. Los directivos de Médicos Sin Fronteras están llevando a cabo una intensa campaña para solucionar este problema con la ayuda de la Organización Mundial del Comercio.

Al aceptar el Nobel, James Orbinski, médico y presidente de la organización, declaró que "mientras en Timor Oriental se está expulsando de sus hogares a familias enteras y mientras por todo el mundo millares de seres humanos son víctimas de conflictos bélicos que no salen en las noticias de primera plana, el Nobel es una importante confirmación del fundamental derecho de todas las gentes a una asistencia y una protección humanitarias."

La dirección de Médicos Sin Fronteras en la WWW es http://www.msf.org/

Informe confeccionado por Graham P. Collins, Carol Ezzell, Sasha Nemecek y Glenn Zorpette.

Replicación del ADN

¿Sobran los puentes de hidrógeno?

Con el descubrimiento, en 1953, de la estructura molecular del ADN por James Watson y Francis Crick comenzó una nueva era en la biología molecular. Propusieron que la estructura de doble hélice del ADN entrañaba un posible mecanismo de replicación.

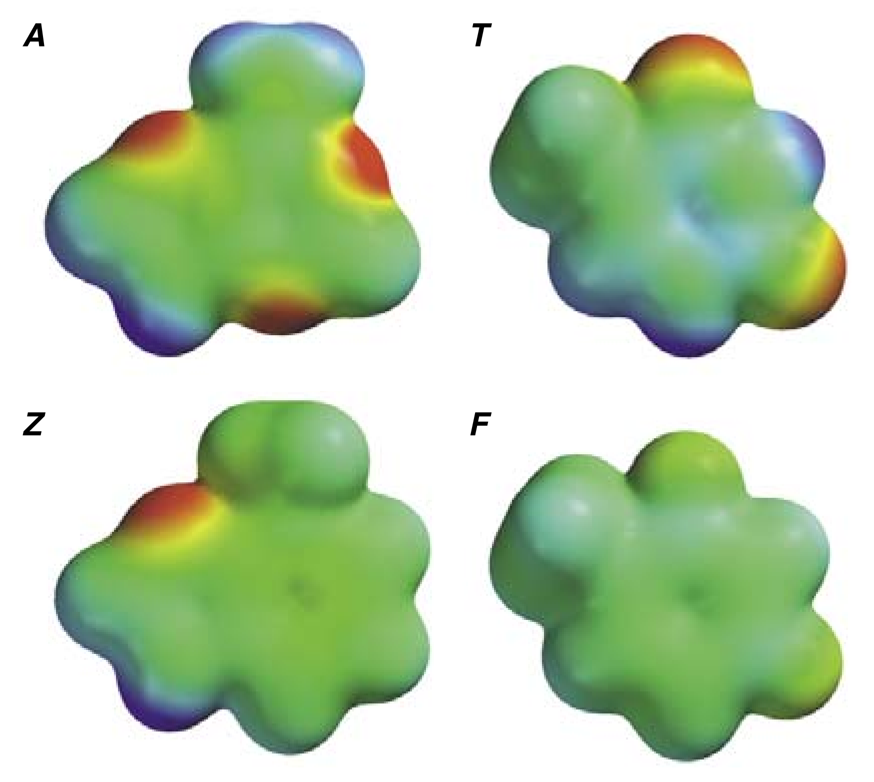
Supusieron que las dos cadenas de nucleótidos, que son complementarias, se soltarían. Desenrollada la hélice, cada cadena suelta serviría de molde para la síntesis de una nueva mitad. Con ello se obtenían dos copias del genoma de la célula. Para que la réplica sea lo más exacta posible y la información genética de la célula se transmita con fidelidad, se favorece la formación de los pares de bases adenina-timina (A-T) y citidina-guanina (C-G).

En la complicada maquinaria que interviene en la replicación las ADN polimerasas constituyen la pieza fundamental. Estas enzimas se enlazan a la hebra que hace de molde y van añadiendo una a una las bases en la hebra naciente para sintetizar el par de bases correcto.

Recientemente, un grupo de químicos de la Universidad de Rochester ha puesto en duda que la clave de esta especificidad resida en los enlaces de hidrógeno entre bases, tesis admitida desde hace años.

En 1997, Kool y su grupo de Rochester publicaron los resultados de sus experimentos de replicación *in vitro* en los que, en vez de timina (T), utilizaban un nucleósido con una base análoga, el difluorotolueno (F). Este nucleósido, que posee la misma forma que T, no forma fácilmente enlaces de hidrógeno. Por lo que afecta a la replicación, sin embargo, apenas si importa que se emplee F o la base natural.

Cuando F forma parte de la hebra molde, la ADN polimerasa sólo realiza bien su trabajo con la adenina. Cuando el nucleósido F se utiliza en su forma activada de trifosfato, se une preferentemente a la adenina en la hebra molde. De esas observaciones se desprendía que los enlaces de hidrógeno —fuerzas muy tenues— no eran decisivos para obtener una copia fiel del ADN. Si bien, una correcta geometría de los pares de bases o los efectos de solvatación de éstas podían importar más a la hora de elegir la base adecuada.



Estructura de las bases naturales del ADN, adenina (A) y timina (T), junto con la de sus análogos apolares, 4-metilbenzimidazol (Z) y difluorotolueno (F). El color refleja el potencial electrostático en la superficie de la molécula; el rojo es negativo y el azul es positivo

La propuesta fue recibida con escepticismo. Para el equipo de Seddon, de la Universidad de Belfast, "quizá la hipótesis sobre la incapacidad del análogo F para establecer enlaces de hidrógeno es incorrecta y, erróneas, las conclusiones de sus experimentos". En el diseño del análogo de timina, el equipo de Kool sustituye en el anillo aromático los enlaces C=O por C—F y N—H por C—H, de modo que la nueva molécula posee grupos con menor capacidad dadora y aceptora de enlace de hidrógeno. Según los cálculos *ab initio* realizados por el grupo de Seddon, F posee un momento dipolar muy similar al del agua; además, en fase gaseosa, forma enlaces de hidrógeno con adenina casi tan fuertes como T, lo que explicaría su éxito al imitar a la base natural T durante la replicación.

Sin embargo, cuando Wang y Houk, de la Universidad de California, emplearon un modelo donde el disolvente era el agua, obtuvieron que, a diferencia de la energía del complejo A-T, fuertemente atractiva, la energía del complejo A-F resultaba ligeramente repulsiva. Por otro lado, las distancias entre A y F eran de 3,53 angstrom, lejos de las típicas para enlaces de hidrógeno (inferiores a tres angstrom).

El hecho de que los cálculos en fase gaseosa apunten a la existencia de enlaces de hidrógeno entre A y F, no es significativo, ya que los experimentos de replicación se llevan a cabo en medio acuoso. En efecto, las bases A y F están rodeadas de moléculas de agua, que establece fuertes enlaces de hidrógeno con A, debido a su alta polaridad; contra esos enlaces no podrá competir F para formar el par A-F.

Con nuevos datos, Kool y Guckian describieron la estructura por resonancia magnética nuclear de una doble hélice de ADN que contenía el par A-F. En esa estructura la geometría global de la doble hebra se mantenía. Pero las medidas de desnaturalización y las distancias entre A y F, así como su conformación en la hélice demostraban la ausencia de enlaces de hidrógeno.

Había más. Kool y el autor mostraron la eficiente replicación de un análogo apolar de adenina, el 4-metilbenzimidazol (Z), con el análogo apolar de timina, F. En ese proceso, la formación de enlaces de hidrógeno es casi imposible.

Siguiendo la misma estrategia que para F, el diseño de Z consiste en sustituir el grupo dador NH_2 por un grupo CH_3, y el grupo aceptor N por CH. De esa manera apenas si se modifica la forma de la base y, sin embargo, se anula su capacidad de formar enlaces de hidrógeno. Pese a todo, la ADN polimerasa puede formar de una manera eficaz el par Z-F y el inverso F-Z, tratándolos prácticamente como si fueran un par natural A-T.

Ahora bien, si los enlaces de hidrógeno no son necesarios en la replicación del ADN, ¿qué otros factores regulan el proceso? Por lo que parece, el factor principal sería la exclusión por tamaño, como si se tratara de un rompecabezas de piezas grandes y pequeñas. Eso permitiría entender que la ADN polimerasa sintetice el par Z-F, en tanto que resulte más arduo establecer el par Z-Z, demasiado grande para el centro activo de la enzima.

Mas, ¿cómo se justificaría, en el contexto de las bases naturales, que la enzima considere un error la formación de un par de bases pequeñas (por ejemplo, T-T), si en este caso sí habría suficiente espacio? Cabe la posibilidad de que el trifosfato de T ni siquiera llegue a entrar en el centro activo, porque T establezca enlaces de hidrógeno con moléculas de agua del medio, que aumenten el tamaño relativo de la base. O bien, si éstos pueden verse compensados por nuevos enlaces de hidrógeno, la geometría del par T-T se aparte de la normal de Watson y Crick, y el par T-T no encaje bien en el centro activo.

Todas estas indicaciones nos revelan que la disposición de una geometría adecuada de los pares de bases y los procesos favorables de deshidratación de las bases ejercen una influencia sobre la fidelidad en la replicación del ADN mayor que la operada por la formación de fuertes enlaces de hidrógeno entre las bases.

La controversia suscitada al cuestionar un principio de aparente solidez granítica pone de manifiesto el trabajo que queda por realizar para entender el funcionamiento de estas fuerzas intermoleculares, cruciales para replicar el ADN y para múltiples procesos de reconocimiento molecular que se dan dentro y fuera de la célula.

Juan Carlos Morales
Universidad de Rochester,
Nueva York

Nacimiento de nebulosas planetarias

Hen 3-1357

Por nebulosas planetarias entendemos las estructuras de gas ionizado y polvo en expansión que, al final de la vida de las estrellas de masa escasa e intermedia (hasta unas ocho veces la solar) se forman por breve tiempo, como resultado de la expulsión de las capas externas de la atmósfera estelar. Estas estructuras rodean el núcleo desnudo y caliente de lo que antes fue la estrella gigante roja progenitora y poco después se convertirá en una enana blanca.

El estudio y modelización del origen de una nebulosa planetaria presenta graves dificultades. La fase de nebulosa planetaria viene precedida por una etapa de intensa pérdida de masa, que a veces llega a provocar el total oscurecimiento de la luz procedente de la estrella central en longitudes de onda correspondientes a la luz visible. Se trata de una etapa efímera en términos astronómicos; dura entre 1000 y 10.000 años, según la masa inicial de la estrella progenitora. Por culpa de tal brevedad, el número de representantes que en un momento dado se encuentran atravesando esta fase es mínimo.

Con los resultados proporcionados por las sondas espaciales de infrarrojos, la situación cambió. La misión IRAS descubrió que los objetos estelares que se hallan en esa fase de transición presentan colores infrarrojos característicos, que permiten distinguirlos de estrellas normales, galaxias y cuerpos jóvenes asociados a regiones de formación estelar. Tanto las estrellas de la Rama Asintótica de Gigantes, o AGB (del inglés Asymptotic Giant Branch), progenitoras inmediatas de las nebulosas planetarias, como las nebulosas planetarias más evolucionadas, presentan una intensa emisión infrarroja entre 1 y 100 micras, cuyo estudio permite reconstruir los procesos de pérdida de masa sufridos por estas estrellas en el pasado reciente y conectar ambos tipos de objetos en su curso evolutivo.

Nuestro grupo de investigación ha llevado a cabo un proceso de identificación masivo de fuentes IRAS que mostraban los colores infrarrojos adecuados para considerarlos objetos en dicha fase de transición. Para ello se realizaron diversas campañas observacionales en diferentes rangos de longitud de onda, desde el infrarrojo hasta el ultravioleta, con diversos colegas en distintas instituciones.

Hemos descubierto nebulosas planetarias muy jóvenes, enrojecidas por el material circumestelar recién eyectado, y estrellas variables Mira de muy largo período, que han alcanzado los últimos momentos de su vida como estrellas

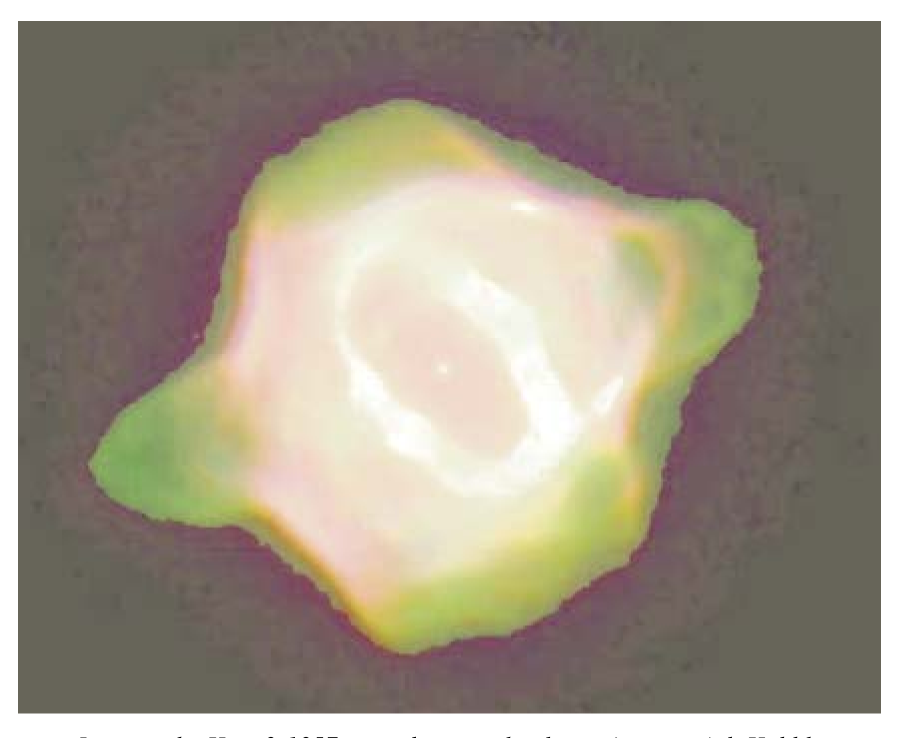


Imagen de Hen 3-1357 tomada por el telescopio espacial Hubble

AGB, muchas de ellas ópticamente invisibles, aunque con una intensa emisión máser de OH detectable en el dominio radio. Y lo que reviste mayor interés, descubrimos numerosas estrellas en la fase post-AGB, algunas con contrapartida óptica muy brillante y con un fuerte exceso infrarrojo. Tales estrellas se encontrarían aún evolucionando en el diagrama H-R hacia regiones de mayor temperatura, en camino de convertirse en estrellas centrales de nuevas nebulosas planetarias.

Con todo, el hallazgo decisivo se refiere a cierta estrella que parece haber evolucionado en el transcurso de sólo dos décadas, desde la fase post-AGB hasta la de nebulosa planetaria. Esta evolución, imprevista por los modelos teóricos, constituye la primera prueba observacional de la conexión entre las estrellas post-AGB y las nebulosas planetarias.

Hen 3-1357, nombre de la estrella en cuestión, se encuentra en el hemisferio sur, en la constelación de Ara. En placas fotográficas tomadas en los años setenta aparece como una estrella de tipo espectral B con características de supergigante (algo que la teoría predice para las estrellas en la fase post-AGB), con sólo una débil emisión de hidrógeno (Hα) sobre un potente continuo estelar.

Cuando nosotros la observamos una noche de julio de 1990 con el telescopio de 1,5 m de La Silla, obtuvimos un espléndido espectro de nebulosa planetaria con todas las características asociadas a una emisión nebular de muy baja excitación. Los resultados fueron corroborados mediante el análisis de espectros de luz ultravioleta con el satélite IUE en sucesivos años; la secuencia de cambios espectaculares indicaba que la estrella estaba sufriendo un violento episodio de pérdida de masa, provocando la exposición del material gaseoso de la envoltura a un flujo energético capaz de producir su ionización.

Pero Hen 3-1357 no nos ha dejado de sorprender. Las imágenes tomadas, por el *Telescopio Espacial Hubble*, en la luz correspondiente a diferentes líneas de emisión han revelado una estructura bipolar y compleja con una extensión de tan sólo 1,6" × 2,3" y la presencia de un anillo ecuatorial, presumible responsable de la colimación del material eyectado. Las imágenes tomadas en longitudes de onda no afectadas por las líneas de emisión propias de la nebulosa muestran que la estrella central de Hen 3-1357 tiene una estrella compañera que parece estar interaccionando en su recorrido orbital con el gas de la envoltura, lo que constituiría, de ser real la relación existente entre ambas, una excelente oportunidad de comprobar las teorías hidrodinámicas que predicen la formación de estructuras bipolares en nebulosas planetarias cuya estrella central forma parte de un sistema binario.

La pregunta surge de inmediato. ¿Es Hen 3-1357 un caso excepcional o procesos similares se dan a menudo en otras estrellas post-AGB? Hasta el momento, no se han detectado cambios espectrales en otras estrellas post-AGB de la muestra. Quizás el único caso similar bien conocido sea el de FG Sge, una estrella post-AGB rodeada de una envoltura nebular extensa, que parece haber evolucionado durante los últimos cien años, pero, ¡en la dirección opuesta a la predicha por los modelos! De confirmarse que los fenómenos esporádicos de pérdida de masa son habituales en estrellas post-AGB y que sus efectos pueden ser la aceleración espectacular del proceso de transición post-AGB → nebulosa planetaria se resolverían las contradicciones en que han incurrido los modelos teóricos en el pasado.

PEDRO GARCÍA LARIO
Centro de Operaciones ISO
Villafranca del Castillo, Madrid

Función protectora

de Bacillus thuringiensis

Objetivo fundamental de la agricultura de todos los tiempos es rentabilizar la producción. Esa meta se hace hoy más acuciante con el crecimiento demográfico. Entre los factores que merman las cosechas destacan las plagas de insectos, que pueden causar pérdidas hasta del 48 por ciento. El remedio habitual ha venido siendo los insecticidas químicos. Según cálculos recientes del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, en ese país se utilizan 350.000 toneladas de pesticidas al año.

El uso indiscriminado de pesticidas ha contaminado el ambiente, inducido resistencia en los insectos y dañado la salud humana. Ante ese cuadro, el empleo alternativo de microorganismos constituye uno de los retos principales de la agricultura moderna. Se ha dado un paso importante con el bioinsecticida, desarrollado a partir de *Bacillus thuringiensis* (Bt).

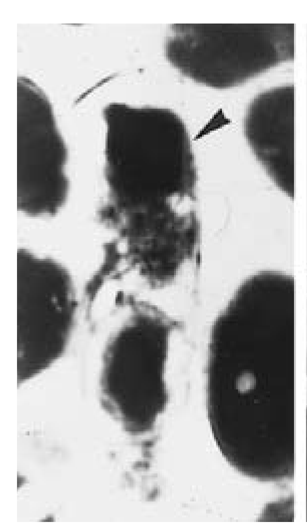
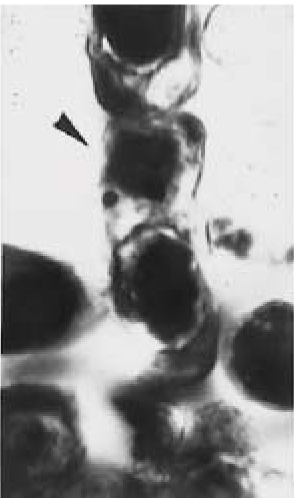
La investigación básica y aplicada sobre ese microorganismo ha sido muy intensa. Se trata de una bacteria aerobia Gram positiva que produce cristales con actividad insecticida. Los cristales están formados por proteínas δ-endotoxinas o proteínas Cry. Merced a su alta especificidad, el bioinsecticida frena la propagación de una plaga determinada, sin afectar al resto de la comunidad. Se han descubierto proteínas Cry específicas contra diversos insectos. Y se conocen hasta 145 secuencias de genes *cry* clasificados en 28 familias, en razón de la homología de aminoácidos compartida.

Las colecciones de cepas de *Bacillus thuringiensis* aumentan sin cesar en laboratorios de todo el mundo y, con ello, el uso potencial de sus propiedades. En efecto, se multiplican las posibilidades de encontrar toxinas con nuevas aplicaciones. Además, aun cuando exista el peligro de desarrollo de resistencia por parte de los insectos plaga, las colecciones ofrecen un amplio arsenal de toxinas que podrían reconocer más de un receptor en una misma especie de insecto, con el bloqueo consiguiente de la adquisición de resistencia.

Alejandra Bravo, del Instituto de Biotecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México, ha reunido una importante colección de cepas de México. Hay cepas con genes múltiples y en combinaciones inéditas, amén de numerosos genes nativos, nuevos al parecer. La diversidad biológica de México, favorecida por su ubicación privilegiada, puente de especiación entre la región neártica y neotropical, convierte a la colección de cepas bacterianas en una de las más ricas e importantes del mundo.

Se han secuenciado y clonado muchos de los genes que cifran las proteínas Cry. El grupo encabezado por Mark Vaeck, de los laboratorios de Plant Genetics Systems en Bélgica, logró en 1987 la primera inserción y expresión del gen de la proteína Cry1Ab de *Bacillus thuringiensis* en plantas de tabaco. Obtuvieron cultivos transgénicos resistentes al ataque de insectos. Así empezó una nueva era en la lucha biológica contra los insectos plaga.

Hoy se han insertado ya otros genes *cry* en tomate, algodón, maíz, arroz, papa y otras plantas de interés alimentario y comercial. El estudio molecular del mecanismo de acción de la toxina ha recibido particular


Microfotografía electrónica donde se aprecian cristales insecticidas de Bacillus thuringiensis*, señalados con flechas*

atención. Una vez que el insecto ha ingerido la δ-endotoxinas, entran en acción receptores específicos que se encuentran sobre la membrana apical del intestino del insecto en su etapa larvaria. La unión al receptor produce cambios conformacionales en la estructura de la proteína y favorece la inserción irreversible de la toxina en la membrana celular. Se forman entonces poros iónicos que alteran la permeabilidad de la membrana, conducen a lisis celular y provocan, por fin, la muerte del insecto.

Por cristalografía de rayos X el grupo de Jade Li, de la Universidad de Cambridge, determinó la estructura tridimensional de la proteína Cry3A. Pawel Grochulski y colaboradores, del Instituto de Biotecnología del Consejo de Investigación Nacional en Canadá, hicieron lo propio con la estructura de la proteína CryIAa. Se supo así que esas proteínas estaban formadas por tres dominios; cada uno desempeñaba una función particular. El dominio 1 participa en la formación del poro, el dominio 2 en el reconocimiento y unión al receptor y el dominio 3 en la estabilidad de la proteína (quizá también en unión al receptor). Ante la notable homología regional que se aprecia entre proteínas Cry, se sospecha que los miembros de la familia presentan estructuras muy similares. La confluencia de ambos factores —el desentrañamiento molecular de los genes que cifran las proteínas Cry y el conocimiento de la relación estructura-función de la proteína— permite la modificación genética precisa de los distintos episodios que conducen a la muerte del insecto. Estos elementos, junto con la amplia diversidad de genes de δ-endotoxinas, hacen de éstas el insecticida más loable y versátil en la lucha biológica.

M. Eugenia Núñez Valdez
Dpto. de Microbiología Molecular,
Instituto de Biotecnología
Universidad Nacional Autónoma
de México

El desfronde en pinares

Criterio de productividad

Llamamos desfronde al proceso de caída de hojas, ramas y frutos que se produce anualmente en las especies arbóreas. Conlleva la acumulación de la hojarasca, o mantillo, en el suelo. Ese proceso de caída y acumulación de materia orgánica constituye la vía principal de aportación de carbono y nutrientes al suelo.

Merced a la descomposición de la hojarasca, los nutrientes volverán a estar disponibles para las plantas. En ecosistemas forestales, aproximadamente el 80 % de los nutrientes provienen del desfronde; el resto procede de la trascolación, la escorrentía cortical y la renovación de raíces. En el desfronde se enlazan, pues, la producción y la descomposición.

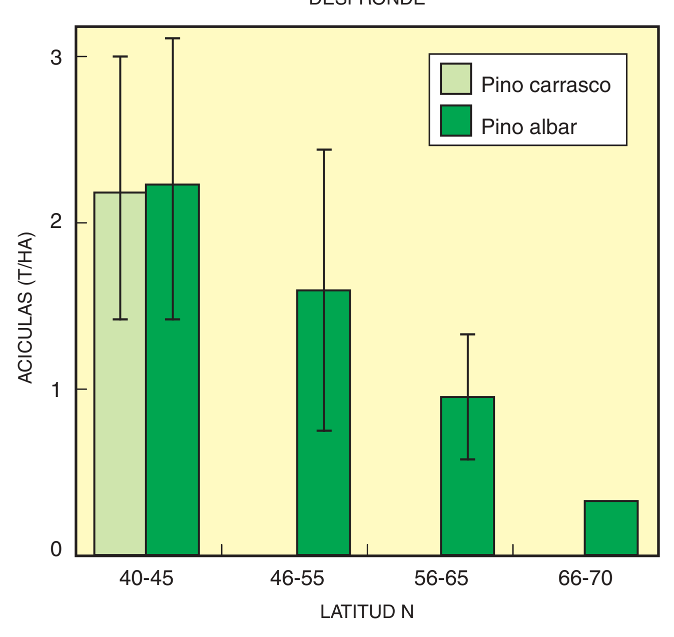
El desfronde anual de especies caducifolias abarca al 100 % de las hojas, porcentaje que varía —según la especie, la edad, las condiciones ambientales y el clima— en las plantas perennifolias, donde se incluyen pinos y otras aciculifolias. Bien estudiado el desfronde del pino albar (*Pinus sylvestris* L.), debido a su interés maderero, existe bastante menos información sobre los pinos mediterráneos.

Para cuantificar el desfronde se instalan colectores debajo del dosel del bosque. Estos colectores, en forma de cono invertido, están provistos de una malla que retiene las hojas y ramas que caen de los árboles. Cuanto mayor sea la superficie total de captación del colector, mayor precisión obtendremos en la estimación del desfronde; cuanto mayor sea el número de colectores, mayor precisión obtendremos en la variabilidad espacial del desfronde. El material vegetal retenido en los colectores se clasifica luego en fracciones (hojas, ramas, frutos, etcétera), se mensura el peso seco y se analizan los nutrientes.

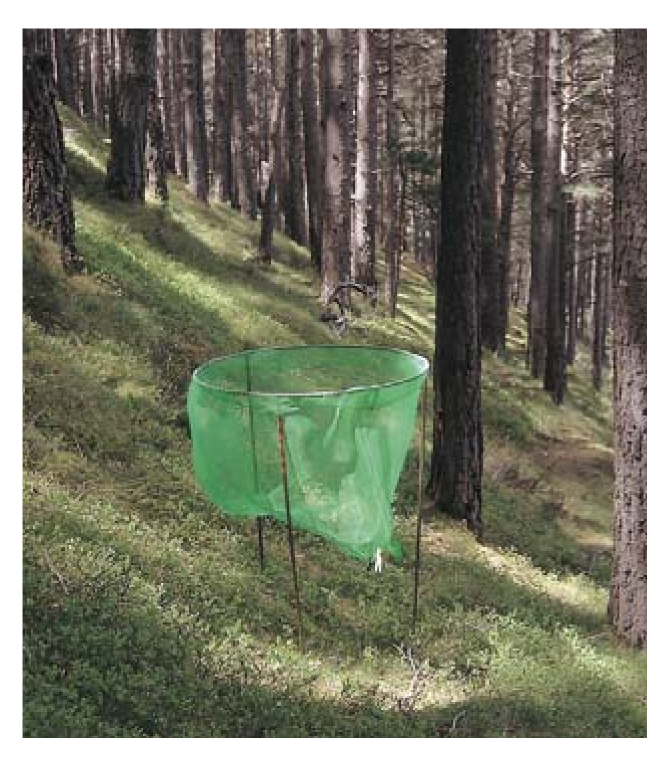
La fracción de acículas se lleva del 50 %-80 % del desfronde total. El porcentaje depende de la edad de los pinos. En pinares jóvenes la fracción de acículas alcanza hasta un 90 % del desfronde. Con ello hemos de conjugar la pauta estacional de la fracción; aproximadamente un 90 % del desfronde anual ocurre durante los meses de verano y otoño. En general, para las especies mediterráneas (pino carrasco, pino piñonero) el máximo desfronde de acículas se produce en verano.

En el Mediterráneo occidental, se han observado en bosques de pino carrasco próximos entre sí valores de desfronde desde 0,9 toneladas por hectárea de acículas en posición de cresta, hasta 3,7 toneladas por hectárea de acículas en fondos de valle, con mayor disponibilidad hídrica. Para explicar las diferencias en el desfronde de acículas en España, península de fuertes variaciones climáticas, altitudinales y topográficas, que conllevan variaciones de temperatura y disponibilidad hídrica en rangos latitudinales pequeños, hemos de atender sobre todo a la evapotranspiración. Por su parte, el desfronde de ramas guarda mayor relación con las perturbaciones (fuertes vientos, nevadas y otros meteoros) que con los parámetros climáticos.

Además de esta variación espacial, existe también una fuerte variación temporal. En años secos la planta no puede mantener toda su biomasa foliar y se incrementa el desfronde. Se ha observado a menudo, que en



1. Media del desfronde de acículas que se ha observado en diferentes pinares europeos, agrupados por rangos de latitud. Las líneas verticales se refieren a la desviación típica. Existe una clara tendencia de descenso del desfronde en los pinares nórdicos de pino albar



2. Colector de hojarasca en un pinar de pino albar del valle de Tosses (Pirineo Oriental, España)

pinares irrigados, si se detiene la irrigación se incrementa el desfronde, provocando una errónea impresión de incremento de producción. Asimismo se ha comprobado que en un año seco, los bosques ibéricos situados en solana —con menor disponibilidad hídrica y menor productividad— presentan mayor desfronde que los bosques en umbría. De ello se infiere que, si bien es cierto que los pinares más productivos muestran un desfronde mayor, hay que tener precaución al utilizar el desfronde como indicador de la productividad cuando se dispone de pocos años de estudio.

JULI G. PAUSAS
Centro de Estudios Ambientales
del Mediterráneo, Valencia

El proyecto IVORY

Reconocimiento de voz en un fondo de ruido

Los sistemas de reconocimiento de voz pueden responder ante diferentes locutores o ante uno dado. Pueden identificar palabras pronunciadas por separado, con pausas deliberadas entre ellas, o al habla continua. Pueden ser sensibles o robustos al ruido, es decir, ver reducidas sus tasas de reconocimiento en ambiente ruidoso o que dicha reducción se produzca de forma menos notoria.

Entre los esfuerzos empeñados en desarrollar un sistema de reconocimiento de voz integrado destaca el proyecto IVORY (“Integrated VOice Recognition sYstem”), orientado hacia palabras aisladas. Se inició en noviembre de 1995 por un consorcio de empresas españolas, italianas y belgas, además de la Universidad Politécnica de Madrid. Se proponía producir sistemas flexibles de reconocimiento de voz, independientes del locutor, y para órdenes aisladas, susceptibles de aplicación en videojuegos de galería. Dichos sistemas deberían ser especialmente robustos al ruido, ya que las galerías de videojuegos son lugares bastante ruidosos (75-95 decibelios). El proyecto terminó oficialmente en abril de 1998.

Para evaluar el efecto del ruido sobre un reconocedor de voz debe tenerse en cuenta la forma en que opera un sistema tal. El primer paso consiste en realizar una estimación paramétrica de la trama de voz para obtener una representación precisa de los patrones espectrales que transmiten la información de significado en tramos con presencia de palabra. Antes se habrá determinado qué segmentos corresponden a palabras válidas y qué segmentos corresponden a zonas silenciosas.

En un segundo paso se procede a la clasificación y codificación de dichos patrones a partir de los registros tomados de un conjunto de locutores “prototipo”, que forman la base de datos para entrenamiento del sistema de reconocimiento. Para clasificar, se mide la distancia entre el patrón analizado y un conjunto de patrones “modelo” previamente generado. Al patrón primero se le asigna un código, que corresponde con el del modelo al que se halle más “próximo”.

Se analiza luego la secuencia temporal de códigos resultante en comparación con un conjunto de modelos generadores de secuencias; cada modelo corresponde a una palabra o comando dado.

Se mide entonces la probabilidad de que la secuencia analizada la haya producido cada uno de los modelos de secuencia disponibles. Se toma como modelo ganador aquel que produzca una medida de probabilidad máxima frente a los restantes.

El ruido influye de manera negativa en este proceso. Difumina las fronteras ente segmentos de palabras y segmentos de silencio. El ruido corrompe el espectro de la voz a analizar, al mezclarse con ella en el micrófono o punto de registro. Los patrones espectrales resultantes

aparecerán "manchados" en ciertas frecuencias donde el ruido sea dominante. Además, por culpa del ruido, el locutor "fuerza" la voz y produce locuciones cuyas características se separan de las generadas en un ambiente silencioso.

Las soluciones aportadas por el proyecto IVORY van orientadas a paliar los efectos del ruido en cada uno de estos ámbitos. El primer paso consiste en el aumento de la relación señal/ruido presente en la traza a reconocer. Para esa reducción de los niveles netos de ruido, se utiliza un doble registro mediante sendos micrófonos. El micrófono primario registra la traza de voz con el ruido ambiente que se adhiere a la misma. El micrófono secundario registra una muestra del ruido ambiente.

Un filtro adaptativo en celosía detecta las características espectrales básicas del ruido ambiente. Un segundo filtro en escalera, combinado con el anterior, realiza una sustracción ponderada del ruido en la traza de voz. Las características adaptativas de ambos filtros permiten que la sustracción sea eficaz aunque el volumen o la naturaleza del ruido o de la voz cambien bruscamente. La ganancia en la relación señal/ruido puede variar entre 10 y 15 decibelios mediante esta técnica.

El mismo mecanismo que permite reducir el nivel de ruido nos faculta para realizar una segmentación precisa en intervalos de palabra frente a intervalos de pausa. Se consigue así que el proceso de reconocimiento se concentre sobre los fragmentos de voz válida y no introduzca fragmentos de señal nocivos para el reconocimiento. Por último se genera una base de datos para el entrenamiento del reconocedor formada por registros tomados en condiciones silenciosas junto a otros tomados en condiciones ruidosas. Este proceso produce modelos de secuencia que tienen en cuenta la variación en la locución debida a la presencia de ruido, y mejoran asimismo las tasas de reconocimiento.

Fruto del proyecto, se ha creado un sistema de entrenamiento de modelos de secuencias para diferentes palabras con independencia de los locutores y teniendo en cuenta los rasgos variables de éstos. El sistema funciona como una aplicación WINDOWS. Se ha generado también una versión del reconocedor robusto de voz en código DSP para el procesador TMS320C31 de Texas Instruments, capaz de ejecutarse en tiempo real. Como complemento se ha diseñado una placa para bus PCI que puede instalarse en un ordenador personal.

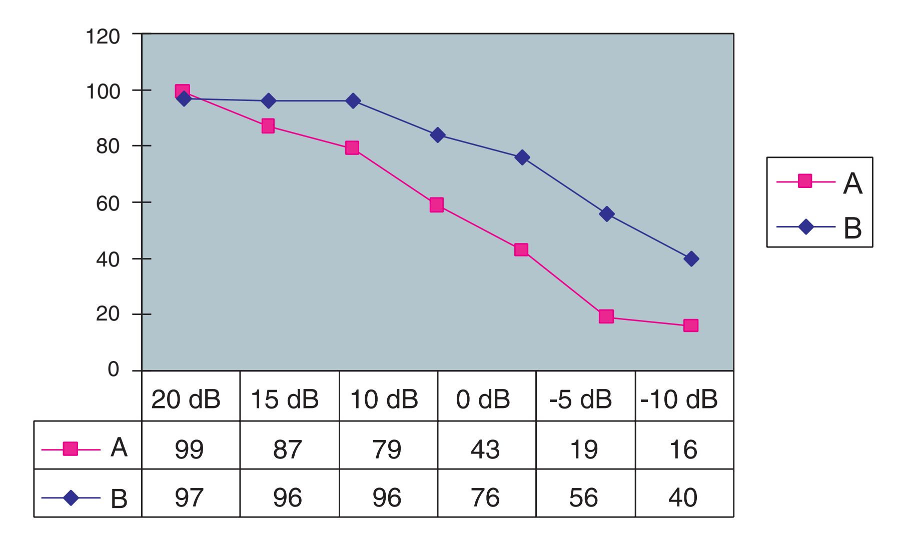
A lo largo del desarrollo del proyecto se han registrado dos bases de datos, una en inglés y otra en español, producidas por un número elevado de locutores. Contienen palabras de uso común como comandos y los nombres de los números del cero al nueve. Estas bases de datos pueden utilizarse juntamente con el sistema de entrenamiento de modelos para producir menús de comandos a medida.

El reconocimiento de palabras aisladas robusto al ruido e independiente del locutor admite múltiples aplicaciones. En general su mayor interés se centra en interfaces de control "manos libres" para ambientes ruidosos.

Pedro Gómez, Rafael Martínez, Agustín Alvarez y Victoria Rodellar
Departamento de arquitectura y tecnología de sistemas informáticos
Universidad Politécnica de Madrid
e-mail: pedro@pino.datsi.fi.upm.es



1. Imagen de la tarjeta PCI desarrollada en IVORY. Está basada en un microprocesador DSP TMS320C31 e incluye un CODEC estéreo, que permite registrar dos canales de entrada, y dispone de una salida analógica. Su banco de memoria estática de 2 MB permite analizar hasta 80 modelos de palabras simultáneamente en tiempo real



	20 dB	15 dB	10 dB	0 dB	-5 dB	-10 dB
A	99	87	79	43	19	16
B	97	96	96	76	56	40

2. Las tasas de reconocimiento se degradan cuando la relación señal/ruido disminuye. La traza A muestra la tasa promedio de reconocimiento (en %) para un conjunto de 32 locutores de ambos sexos sobre 30 palabras cuando no se utiliza cancelación de ruido. La traza B muestra la misma tasa cuando se utiliza cancelación de ruido con una mejora de la relación señal/ruido de unos 10 decibelios

Texto y fotos: Josep-Maria Gili

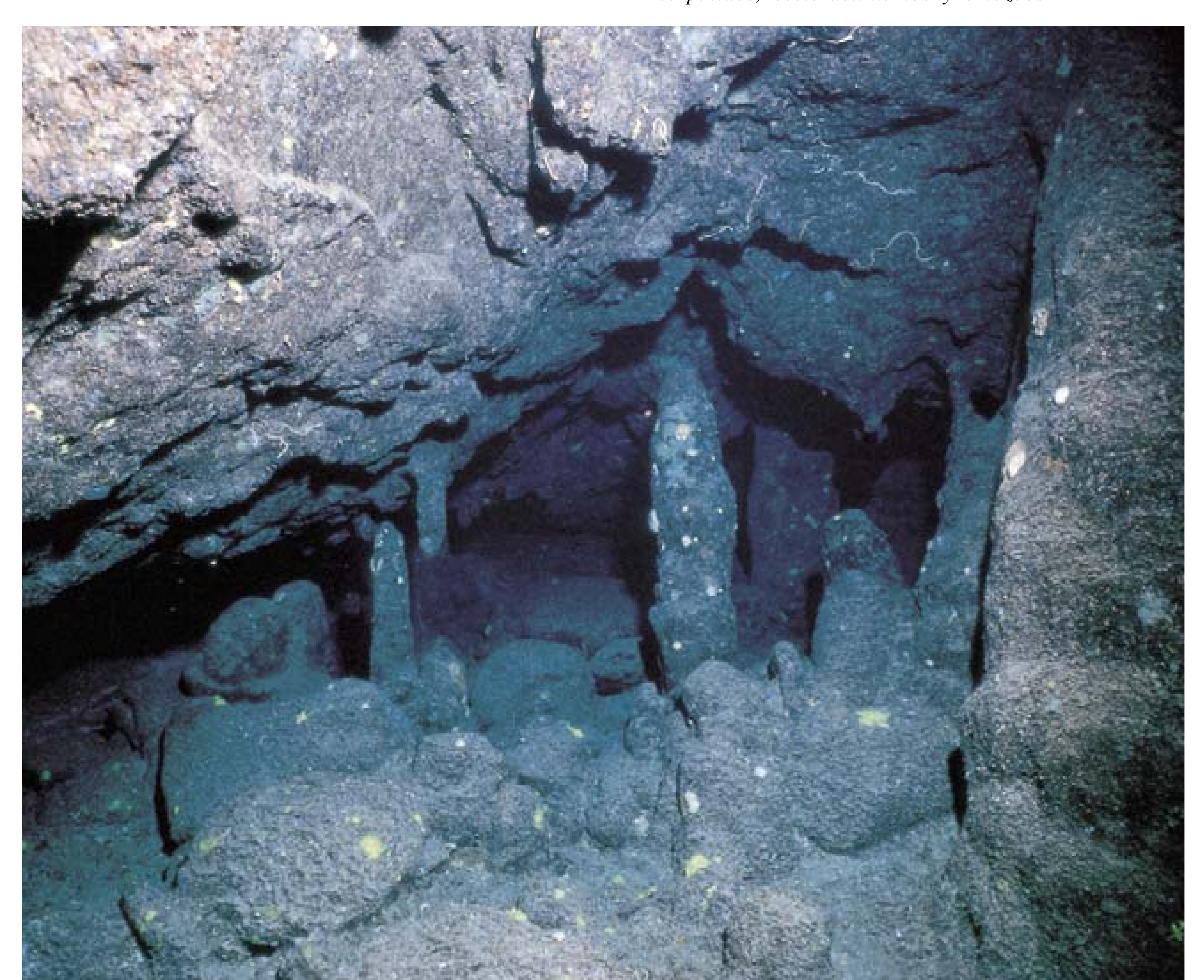
Vida en la oscuridad

Las cuevas submarinas son uno de los entornos más singulares de los ecosistemas marinos del litoral. Se caracterizan por un marcado gradiente en la reducción de la densidad y diversidad de fauna, desde la entrada hacia su interior. Para muchos investigadores, este gradiente, de decenas de metros, es comparable con un gradiente en profundidad desde la zona litoral hasta los mares profundos, que se extiende centenares de metros.

Desde la entrada de las cuevas hacia el interior se produce una reducción drástica de la iluminación, para terminar en completa oscuridad gran parte de las cavidades sumergidas. Paralela a la disminución de luz se da una reducción en la renovación de las masas de agua con la consiguiente reducción del aporte de alimento.

Se originan allí unas comunidades marinas peculiares. Algunas especies cavernícolas reciben su nombre por haberse encontrado sólo en el interior de cuevas, donde, al parecer, desarrollan todo su ciclo de vida. Lo que ha obligado a un proceso evolutivo de especiación que recuerda el de las cavidades terrestres y dulceacuícolas. El resultado ha sido una fauna muy especializada, como se puede observar en sus formas anatómicas, en su comportamiento o en sus procesos de alimentación y reproducción (*véanse las fotografías*). Una de las características más llamativas del ambiente cavernícola es la quietud y el aislamiento de las condiciones ambientales externas. Los organismos que viven en las cuevas evocan a menudo formas del pasado que pueden considerarse, en algunos casos, como relictas de épocas geológicas.

1. Vista general de una cueva submarina del litoral de Mallorca. Se distinguen las paredes y estalactitas cubiertas por los escasos colonizadores bentónicos que las habitan: esponjas, poliquetos serpúlidos, escleractiniarios y briozoos





2. Vista de una roca en el suelo de una cavidad situada más de cien metros hacia el interior de una cueva submarina. Hay esponjas; Rhabderemia minutula *genera propágulos como resultado de su reproducción asexual. La escasez de individuos o colonias de la misma especie hace que la reproducción asexual domine sobre la sexual*



3. Ejemplar de Oligopus ater*, pez que se encuentra en solitario o formando parejas en las zonas más oscuras de las cuevas. Carece de ojos bien formados y se mueve lento y pausado*



4. Stenopus spinosus. *Este crustáceo decápodo es uno de los habitantes más singulares de las cuevas submarinas mediterráneas. Desarrolla unas largas antenas, muy sensibles, para detectar los movimientos de otros organismos en las zonas de completa oscuridad*



5. Palaemon serratus *es un habitante frecuente en las zonas semioscuras de las cuevas, donde se encuentra solitario o formando pequeños grupos. Se ha habituado a alimentarse de restos orgánicos como hojas de fanerógamas* (izquierda de la fotografía)*, arrastradas por las corrientes hasta el interior de las cuevas*

El código de la vida, descifrado

En el desentrañamiento del genoma de diversas especies hallaremos respuesta a algunas de las cuestiones más apasionantes sobre la vida

Francis S. Collins y Karin G. Jegalian

Cuando, en el futuro, los historiadores vuelvan su mirada hacia el cambio de milenio que estamos atravesando, reconocerán que el principal avance científico de esa etapa fue la caracterización minuciosa de las instrucciones genéticas que conforman nuestro ser. De los éxitos del Proyecto Genoma Humano —que se propone cartografiar y descifrar letra a letra el código encriptado de la vida, el ADN— sacarán partido todas las ramas de la biología. El descubrimiento de la secuencia completa del ADN de un número creciente de especies, hombre incluido, traerá las respuestas que se plantean sobre la evolución de los organismos, la síntesis *in vitro* de la vida, la terapia de múltiples patologías y otras cuestiones de parejo tenor.

En el marco del Proyecto Genoma Humano se están recabando datos biológicos en cuantía hasta ahora desconocida. El mero listado de bases, o unidades de ADN que constituyen el genoma humano, llenaría más de 200 gruesos directorios telefónicos; y eso sin determinar qué es lo que opera cada una de dichas secuencias de ADN. Dentro de unos meses deberíamos tener entre las manos un borrador de trabajo del 90 por ciento de la secuencia completa del ADN humano. La secuencia entera se coronará en el año 2003. Con ello dispondremos ya del esqueleto. Necesitaremos muchas capas de anotaciones para revestirlo de su significado cabal. De la comprensión de las proteínas codificadas por los genes habrá de llegarnos el pleno sentido de tamaña investigación.

Las proteínas no sólo constituyen el armazón estructural del organismo; entre ellas encontramos también las enzimas que catalizan las reacciones bioquímicas de la vida. Se componen de unidades, que son los aminoácidos, enlazados en largas cadenas. Cada cadena se pliega de manera precisa para determinar así la función de la proteína. El orden de los aminoácidos viene dictado por la secuencia de las bases del ADN, que determina una proteína, a través del ARN intermediario. De los genes que forman activamente ARN se dice que se “expresan”.

El Proyecto Genoma Humano busca identificar todas las proteínas que se sintetizan en el hombre. Se propone, además, avanzar en varios frentes de comprensión: el mecanismo en cuya virtud se expresan los genes que cifran las proteínas, el empaquetamiento de las secuencias de tales genes en función de genes equiparables de otras especies, la variabilidad génica en el seno de nuestra especie y la traducción de las

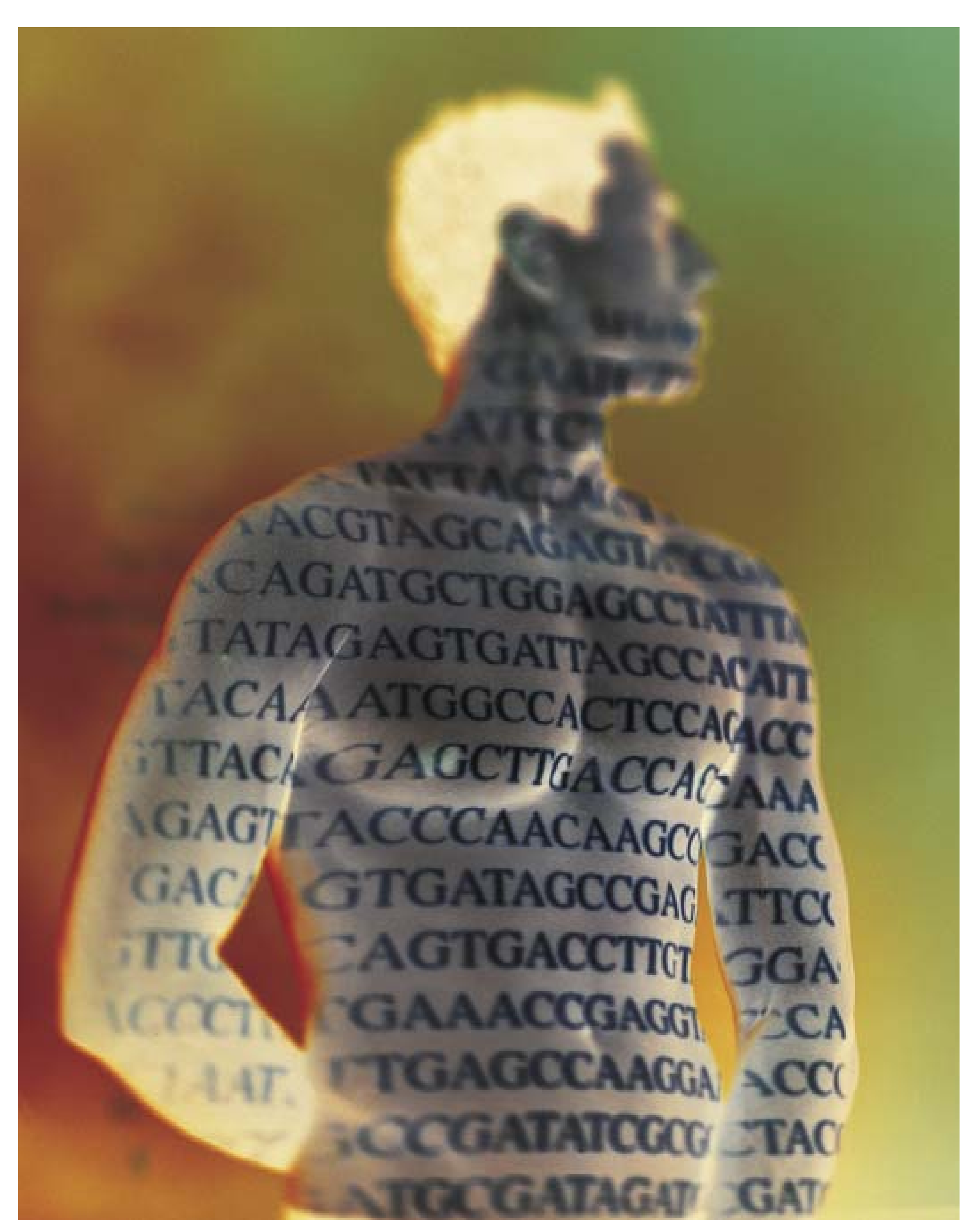
secuencias de ADN en caracteres observables. Las capas de información superpuestas sobre la secuencia de ADN revelarán el conocimiento encerrado en ésta. A lomos de esos datos cabalgará la investigación biológica de los próximos cien años. En una suerte de círculo "virtuoso", cuanto más aprendamos, tanto más podremos extrapolar, emitir nuevas hipótesis y profundizar.

Pensamos que, para el año 2050, la genómica contará con los recursos precisos para contestar las siguientes cuestiones:

• *¿Se podrá predecir la estructura tridimensional de las proteínas a partir de su secuencia de aminoácidos?*

Los 6000 millones de bases del genoma humano determinan unas 100.000 proteínas. Aunque podemos conocer la secuencia de aminoácidos de una proteína, a partir de la secuencia del ADN de un gen, no está todavía a nuestro alcance pergeñar la forma de la proteína valiéndonos de reglas teóricas. Y determinar experimentalmente las estructuras resulta bastante laborioso. Ahora bien, la estructura de una proteína se conserva, esto es, persiste relativamente constante a través de la evolución, mucho más que la secuencia de sus aminoácidos. Secuencias que difieren en su serie de aminoácidos componentes pueden dar proteínas con morfología similar; por eso mismo, podemos inferir las estructuras de proteínas diversas al estudiar pormenorizadamente un subgrupo de proteínas.

Hace poco, un grupo internacional de biólogos ha acometido la llamada "Iniciativa de Estructura de Proteínas" con el fin de coordinar sus trabajos estructuralistas. Estos expertos "resuelven" las formas de las proteínas por un doble camino: creando cristales muy puros de una proteína en cuestión y bombardeándolos luego con rayos X, o bien sometiendo la proteína de marras a un análisis de resonancia magnética nuclear (RMN). Ambas técnicas, tediosas, resultan muy caras. Busca ese consorcio internacional extraer la máxima información de cada nueva estructura



1. El genoma humano contiene todas las instrucciones bioquímicas —combinaciones de las bases nucleotídicas *A*, *T*, *C* y *G* — para formar y mantener un ser vivo.



aprovechando el conocimiento recabado de estructuras emparentadas, para agrupar así las proteínas en familias que verosímilmente compartan los mismos rasgos arquitectónicos. En una etapa ulterior, habrán de examinar representantes de cada familia con técnicas físicas.

Conforme va creciendo el catálogo de estructuras resueltas y se van perfilando esquemas más refinados que agrupen las estructuras en un compendio de formas básicas, los bioquímicos depuran progresivamente sus programas de ordenador para obtener el modelo de las estructuras de proteínas recién descubiertas o incluso inventadas. Los biólogos estructurales aventuran que habrá unos 1000 motivos básicos en el plegado de las proteínas. A tenor de los modelos actuales, bastará resolver de 3000 a 5000 estructuras seleccionadas, amén de las ya conocidas, para deducir en adelante de forma rutinaria las estructuras de nuevas proteínas. Puesto que los biólogos moleculares resuelven más de 1000 estructuras de proteínas cada año y, habida cuenta de la aceleración del progreso, cabe presumir que se completará el inventario no mucho después de la secuenciación absoluta del genoma humano.

• *¿Se producirán* in vitro *formas de vida?*

Acabamos de ver que los biólogos estructurales se afanan en agrupar las proteínas en distintas categorías para así resolver las estructuras de una manera eficiente. Pues bien, esa proclividad de las proteínas a someterse a clasificación refleja un claro significado biológico. Testimonia el decurso evolutivo en la Tierra y nos lleva de la mano hacia las cuestiones centrales del fenómeno de la vida. ¿Hay un grupo de proteínas compartido por todos los organismos? ¿Cuáles son los procesos bioquímicos necesarios para que exista vida?

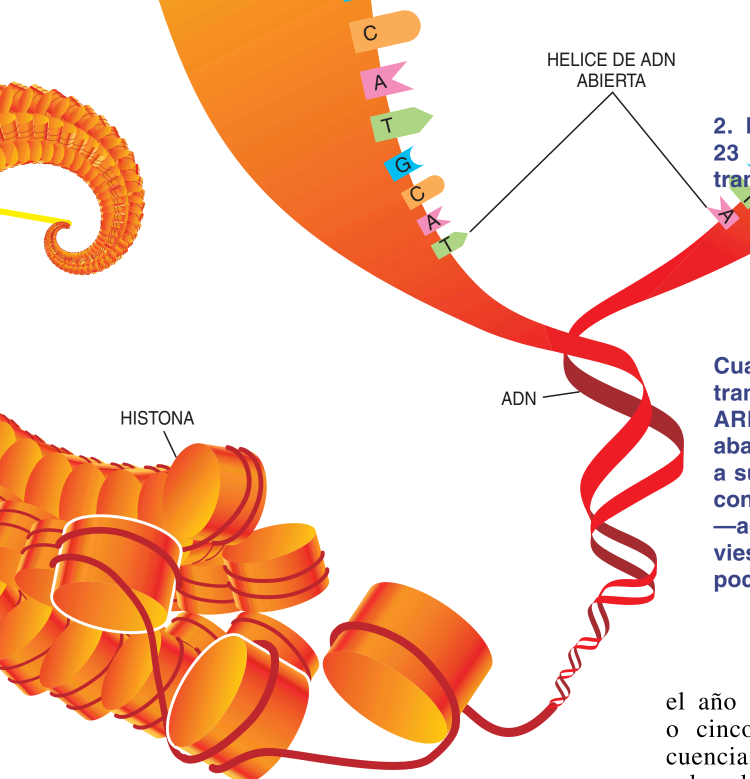
Con unos cuantos genomas ya secuenciados —del mundo bacteriano sobre todo—, se han abordado los primeros inventarios de genes conservados en esos organismos, puesta la mente en la pregunta crucial de qué es lo que constituye la vida, al menos en el ámbito unicelular.

Si dentro de unos años se lograra listar un elenco de productos génicos —ARN y proteínas— necesarios para la vida, tal vez pudiera construirse un ADN concatenando bases hasta obtener un genoma de nuevo cuño, que cifre productos inéditos. Y si ese genoma inventado sirve para asentar una célula nueva en torno a él, y si esa célula tiene virtualidad replicativa, el ejercicio demostraría que se habían descifrado los mecanismos fundamentales de la vida. Un experimento de ese tipo plantearía cuestiones éticas, teológicas y de seguridad que no pueden dejarse de lado.

• *¿Lograremos construir un modelo informático de célula que contenga todos los componentes, identifique todas las interacciones bioquímicas y prevea con fundamento las consecuencias de cualquier estímulo ejercido sobre esa célula?*

En los últimos 50 años transcurridos, un gen o una proteína absorbía la carrera investigadora de un biólogo. En el medio siglo próximo, los investigadores pasarán a estudiar las funciones integradas de muchos genes, la red de interacciones entre vías génicas y la influencia de estímulos externos en el sistema.

Cierto es que, desde hace bastante tiempo, los biólogos se han esforzado en describir los mecanismos de interacción mutua entre componentes celulares; por ejemplo, la unión de los factores de transcripción a zonas precisas del ADN para controlar la expresión de un gen o el engarce entre la insulina y su receptor en la superficie de una célula muscular, con el desencadenamiento consiguiente de una cascada de reacciones dentro de la célula que multiplica el número de transportadores de glucosa en su membrana. Pero el Proyecto Genoma extenderá análisis semejantes a millares de genes y componentes celulares. En los cincuenta años próximos,



2. El genoma humano está encerrado en 23 pares de cromosomas que se encuentran en el núcleo celular. Cada cromosoma consta de una doble hélice de ADN, que ciñe las histonas. Los complejos ADN-histona se enrollan y se vuelven a enrollar para formar los cromosomas. En última instancia, el Proyecto Genoma Humano se propone desentrañar las proteínas cifradas por el ADN. Cuando se activa un gen, la célula acomete el proceso de transcripción, en cuya virtud el ADN del gen se copia en ARN mensajero (ARNm). Esta molécula monocatenaria abandona el núcleo para asociarse con ribosomas, que, a su vez, traducen el ARNm en cadenas de aminoácidos conformantes de la proteína codificada. La nueva proteína —aquí un receptor cuyo destino es la membrana— atraviesa varias etapas de plegamiento en una secuencia que poco a poco comienza a desentrañarse.

con todos los genes identificados y todas las interacciones y reacciones celulares cartografiadas, los farmacólogos al desarrollar una nueva medicina o los toxicólogos al predecir si una sustancia es venenosa podrán dirigir su atención a los modelos informáticos de las células para encontrar la respuesta que demanda su búsqueda.

• *¿Se conocerán en todo su pormenor los mecanismos en cuya virtud los genes determinan el desarrollo de los mamíferos?*

La construcción de un modelo celular será un hito. Mas para comprender plenamente las formas vivas que nos son familiares tendremos que considerar niveles adicionales de complejidad. Habrá que examinar el comportamiento, en tiempo y lugar, de los genes y sus productos; es decir, aclarar su conducta en una u otra región del organismo y en un cuerpo que además cambia a lo largo de su vida. Los biólogos del desarrollo comienzan a seguir la pista de conjuntos de productos génicos que varían durante el desarrollo de los tejidos, con el fin de acotar los productos que definen las etapas del desarrollo. Empiezan a pergeñar matrices de expresión, así se llaman, que inspeccionan miles de productos génicos a la vez, cartografiando cuáles se activan, cuáles se desactivan y cuáles presentan una expresión de intensidad fluctuante. Merced a ese tipo de técnicas salen a la luz muchos genes idóneos para dirigir el desarrollo y establecer el diseño del organismo animal.

Lo mismo que antaño, la mosca *Drosophila*, el nemátodo *Caenorhabditis elegans* y el ratón seguirán siendo los prototipos animales en investigación de biología del desarrollo. Con la secuencia del *C. elegans* ya terminada, la de la *Drosophila* a punto de culminarse, la secuencia humana que estará completa para el año 2003 y la del ratón dentro de cuatro o cinco años, las comparaciones entre secuencias se multiplicarán y ofrecerán claves sobre dónde buscar las fuerzas motrices de la configuración del organismo. Con el abaratamiento de los costes, se irán sucediendo las secuenciaciones de genomas representativos de las diversas ramas del árbol evolutivo.

Hasta ahora el énfasis se ha puesto en la búsqueda de señales de interés universal en el diseño del plan corporal, la disposición de miembros y órganos. Con el tiempo se estudiarán las variaciones —de secuencia génica y tal vez de regulación de genes— que dan cuenta de la diversidad de formas que reina entre especies diferentes. Mediante la comparación de especies descubriremos las modificaciones sufridas en los circuitos genéticos que les indujeron a ejecutar distintos programas, de suerte tal que, con redes de genes casi equivalentes, se moldeen las patas peludas del ratón y los brazos del hombre.

• *¿Nos permitirá el conocimiento del genoma humano transformar la práctica médica en punto a prevención, diagnóstico y terapia?*

La biología molecular ha venido auspiciando la transformación de la medicina desde un empirismo aleatorio hasta un método inquisitivo racional, basado en la comprensión fundamental de los mecanismos de la vida. Su progreso repercute ya en la praxis médica. La genómica intensificará esa tendencia. De aquí a cincuenta años es de esperar que conozcamos las bases moleculares de las enfermedades, podamos prevenirlas en muchos casos y contemos con los medios para prescribir tratamientos precisos e individualizados.

En el próximo decenio, las pruebas genéticas revelarán la tendencia o exposición a una enfermedad. Entre otras misiones, compete al Proyecto Genoma Humano identificar variaciones genéticas comunes. Una vez confeccionada la lista, la epidemiología establecerá la correlación

Se estudiarán **la red de interacciones entre trayectorias de genes** y la influencia de factores externos en el sistema.



3. El árbol de la vida ilustra la doctrina vigente sobre las relaciones de parentesco entre los seres, hombre incluido. Una vez conocida la secuencia de ADN del genoma humano, podremos compararla con secuencias genómicas de otras especies. Y a partir de la información obtenida, podremos inferir la evolución seguida por la vida en el planeta.

entre variaciones y riesgo de contraer una enfermedad. Cuando conozcamos el genoma en su integridad, se nos revelará el papel de los genes que, si bien por sí mismos contribuyen sólo débilmente a las enfermedades, al interaccionar con otros genes y ciertos factores ambientales (dieta, infecciones y exposición prenatal), afectan a la salud. Del año 2010 al 2020 la terapia génica deberá haberse implantado ya como un tratamiento habitual, al menos para un cuadro restringido de condiciones.

De aquí a 20 años habrán aparecido fármacos nuevos, fruto del avance en el conocimiento molecular de enfermedades comunes, como la diabetes o la hipertensión. Los fármacos, de notable potencia, se dirigirán hacia determinadas moléculas y carecerán de efectos secundarios. Las medicinas anticancerosas, por señalar un ejemplo, se ajustarán a la respuesta que dé el paciente, prevista de acuerdo con el examen de sus “huellas digitales” de ADN. Se afinará en el diagnóstico de muchas afecciones; así, el paciente informado de una concentración excesiva de colesterol, sabrá también qué genes son los responsables, qué efectos acarrea esa demasía y qué dieta y medios farmacológicos le son recomendables.

Hacia el año 2050 muchas enfermedades potenciales se curarán en el ámbito molecular antes de que se manifiesten. Mas, por culpa de las desigualdades mundiales en el acceso a esos avances, se seguirán levantando tensiones. Ante un enfermo, la terapia génicas y la farmacológica se centrarán en el gen responsable, lo que habrá de permitir un tratamiento preciso, personalizado. La vida media llegará a los 90 o 95 años; y su ocaso se retrasará con el conocimiento profundo de los genes del envejecimiento.

• *¿Reconstruiremos la historia de las poblaciones humanas?*

Pese a la diversidad manifestada en el seno de nuestra especie, a lo largo de los últimos diez años se ha demostrado que la especie humana es más homogénea que otras muchas. Presenta, sin ir más lejos, una variabilidad menor que los chimpancés. En los humanos suelen darse en todos los grupos de población las mismas variaciones genéticas. A las diferencias entre grupos sólo podemos atribuirles una pequeña fracción de la variación total: entre un 10 y un 15 por ciento. De esa comprobación algunos biólogos de poblaciones extraen la conclusión según la cual la especie humana constaba, no hace mucho, de un grupo restringido, quizá no superior a los 10.000 individuos; la dispersión de las poblaciones por la Tierra sería un fenómeno reciente. La mayoría de las variaciones genéticas acontecerían antes de ese momento.

Armados con las técnicas analíticas del ADN, los genéticos de estos últimos 20 años han abordado, con claridad inédita, cuestiones del máximo interés antropológico. Las migraciones, los cuellos de botella y las expansiones de población alteran las frecuencias de genes y dejan así un registro detallado y completo de los avatares de la historia del hombre. De acuerdo con los datos genéticos, el hombre moderno apareció hará sólo unos 100.000 o 200.000 años, en Africa; desde allí se dispersó poco a poco por el resto del mundo. Los antropólogos se han servido del ADN para someter a prueba tradiciones culturales acerca del origen de los gitanos o los judíos, para seguir la pista de la migración del hombre hacia las islas del sur del Pacífico y América, y para esbozar una idea de conjunto sobre la difusión de las poblaciones en Europa, entre otros ejemplos. Conforme resulte más fácil la acumulación de secuencias de ADN, se descubrirán con mayor nitidez las relaciones entre grupos de poblaciones, los episodios de mezcla y los

períodos de separación y migración. Se verá que los conceptos de raza y etnia son meros constructos sociales y culturales, carentes del menor respaldo biológico.

En el ecuador del siglo XXI conoceremos mejor las poblaciones humanas. Pero, ¿cuánto más podremos saber? A lo largo de su historia, los hombres se han cruzado con el abandono suficiente para que ningún árbol familiar encierre la explicación cabal de su pasado. La historia de las poblaciones no emergerá de un árbol, sino de una suerte de enrejado con cruces frecuentes de líneas y mezcla tras intervalos de separación. Veremos también, dentro de 50 años, cuánta ambigüedad queda todavía en la reconstrucción de nuestro ayer.

• *¿Podremos reconstruir las etapas principales de la evolución de la vida sobre la Tierra?*

Desde los años sesenta la taxonomía ha contado, entre sus útiles indispensables, las secuencias moleculares. En buena medida, las secuencias de ADN cifran 3500 millones de años de evolución: distribuyen los seres vivos en tres dominios —Archaea (unicelulares de origen remotísimo), Bacteria y Eukarya (organismos cuyas células poseen un núcleo)— y revelan los patrones de ramificación de múltiples reinos y divisiones. Por culpa de cierto aspecto de la herencia se aleja la esperanza de asignar todos los seres vivos a ramas de un mismo árbol. En numerosas ocasiones, según qué genes miremos trenzaremos una historia familiar u otra para los mismos organismos. Ello se debe a que el ADN no se hereda siempre de una manera rectilínea, de padres a hijos, con una mayor o menor cadencia temporal de mutaciones. A veces los genes saltan a través de grandes hiatos evolutivos. Lo vemos en mitocondrias y cloroplastos, orgánulos de animales y plantas encargados del suministro de energía. Mitocondrias y cloroplastos albergan su propio material genético y descienden de bacterias engullidas enteras por células eucarióticas.

Semejante estrategia de "transferencia lateral de genes" parece haber sido un fenómeno bastante común en la historia de la vida. Por tanto, cuando comparemos genes de distintas especies no obtendremos siempre un dendrograma único y universal. Igual que acontecía con los linajes humanos, para explicar la historia de la vida se ajusta mejor la imagen de un enrejado, en el que líneas separadas divergen y se unen de nuevo, que la representación de un árbol en el que las ramas nunca vuelven a trabarse.

Así que pasen 50 años se habrán rellenado muchos huecos de la historia de la vida, aunque quizá sigamos ignorando cómo surgieron exactamente los primeros organismos que se autorreplicaban. Sí sabremos cuándo y cómo surgieron diversas líneas, se adoptaron o se adaptaron genes para adquirir grupos nuevos de reacciones bioquímicas o diferentes planes corporales. La perspectiva genética habrá permeado de tal modo la biología, que la unidad básica habrá dejado de ser el organismo o la especie para cederle ese estatuto al gen. Se cartografiarán las rutas recorridas juntas por varios genes, su tiempo de coincidencia y en qué genomas. Y se planteará, una vez más, la cuestión que inquieta a la gente desde Charles Darwin: ¿Qué es lo que nos hace humanos? ¿Qué es lo exclusivo de nuestra especie?

Surgirán otras preguntas. Como en cualquier campo fecundo del saber, los resultados abrirán nuevos interrogantes. Paradójicamente, conforme adquiera mayor importancia, la genómica podría perder sus propios perfiles, al irradiar otras áreas y terminar absorbida en la infraestructura de todas las disciplinas biomédicas.

• *¿Cómo responderán los individuos, familias y sociedad a esta explosión de conocimientos sobre nuestro legado genético?*

A diferencia de las cuestiones precedentes, de carácter científico, técnico y médico, esta pregunta de corte social no parece admitir una respuesta tajante. La información y la técnica genética aportarán grandes posibilidades de mejora de la salud y remedio del dolor. Pero no hay técnica eficaz sin riesgos; cuanto más drástica la técnica, mayores serán también los riesgos. Con perversa voluntad algunos se escudan hoy en supuestos argumentos genéticos para justificar su racismo abierto o solapado. De la información extraída de análisis del ADN cada vez más extendidos se han servido empresas de seguros y jefes de personal para negar el acceso a mutuas médicas o a un puesto de trabajo.

¿Se aquietarán los movimientos contrarios al progreso técnico ante los descubrimientos de la genética? Quizá sea negativa la respuesta que tengamos que dar. La tensión entre los avances científicos y el deseo profundo de un estilo de vida "natural" se intensificará a buen seguro, conforme la genómica vaya penetrando en nuestra vida diaria. Habrá que esforzarse por lograr un equilibrio saludable y asumir la responsabilidad de que el progreso que trae la genómica no se ponga al servicio de fines torvos.

LOS AUTORES



FRANCIS S. COLLINS dirige, desde 1993, el Instituto de Investigación sobre el Genoma Humano, dependiente del Instituto Nacional de la Salud. Antes trabajó en la Universidad de Michigan, donde con su equipo clonó el gen de la fibrosis quística. En coherencia con su confesada fe cristiana, le interesan las implicaciones éticas de la investigación en genética humana.



KARIN G. JEGALIAN se doctoró en biología en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Está contratada por el centro que encabeza Collins.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

NEW GOALS FOR THE U.S. HUMAN GENOME PROJECT: 1998-2003. Francis S. Collins y cols. en *Science*, vol. 282, págs. 682-689; 23 de octubre de 1998.

PRINCIPLES OF MEDICAL GENETICS. Segunda edición. Thomas D. Gelehrter, Francis S. Collins y David Ginsburg, Williams and Wilkins, 1998.

SHATTUCK LECTURE — MEDICAL AND SOCIETAL CONSEQUENCES OF THE HUMAN GENOME PROJECT. Francis S. Collins en *New England Journal of Medicine*, vol. 341, n.º 1, págs. 28-37; 1 de julio de 1999.

The National Human Genome Research Institute tiene su dirección en www.nhgri.nhi.gov/ en Internet.

La dirección del Departamento de Energía sobre el Proyecto del Genoma Humano es www.ornl.gov/hgmis/ en Internet.

Bases genéticas y ambientales de la conducta

¿Está el comportamiento humano determinado por aspectos genéticos o por el entorno? Quizás ha llegado el momento de abandonar la dicotomía

Frans B. M. de Waal

Los defensores del comportamiento innato y los partidarios del adquirido han estado enfrentados durante más tiempo del que puedo recordar. Mientras los biólogos han creído desde siempre que los genes intervenían en el comportamiento humano, los sociólogos han militado en masa en el bando contrario, el que afirma que somos obra nuestra, libres de las cadenas de la biología.

Viví el fragor de ese debate en los años setenta. Si en mis conferencias abiertas aludía a las diferencias existentes entre los sexos en los chimpancés —mayor agresividad y ambición en los machos que en las hembras—, se levantaban protestas airadas. ¿No estaría proyectando mis propios valores sobre esos pobres animales? ¿Hasta qué punto eran rigurosos mis métodos? ¿Por qué me molestaba en comparar los sexos? ¿Acaso escondía segundas intenciones?

Hoy, esa misma información aburre al auditorio. Ni siquiera las comparaciones directas entre el comportamiento humano y el de los primates, tema antaño tabú, consigue llamar la atención de nadie. Todo el mundo ha oído hablar de que los hombres provienen de Marte y las mujeres de Venus. Todo el mundo ha visto en los semanarios gráficos tomografías de emisión de positrones de cerebros humanos tomadas durante la ejecución de diversas tareas, y en las que aparecen iluminadas áreas diferentes según se trate de un varón o de una mujer.

Pero en esta ocasión la preocupación me acucia a mí. En vez de celebrar la victoria del enfoque biológico, considero que algunas de las dicotomías contemporáneas entre hombres y mujeres son simplificaciones extremas, acordes con un supuesto buen gusto social y realizadas con resabios antimachistas (por ejemplo, cuando se habla de "envenenamiento de testosterona" para aludir a efectos hormonales nor-

1. Para averiguar qué parte corresponde a la genética y qué parte a la educación y el entorno en el comportamiento humano, se han estudiado gemelos criados por separado. Estos hermanos se reencontraron ya de adultos. Ambos eran bomberos y se habían dejado bigote.

males). Estamos todavía muy lejos de entender, en su sutil complejidad, la relación existente entre genética y entorno. La sociedad ha permitido el movimiento pendular desde el comportamiento aprendido al innato, dejando atrás un gran número de sociólogos confundidos. Todavía nos gusta expresarlo todo basándonos en una u otra tendencia, en lugar de considerar ambas a la vez.

Es imposible saber hacia dónde evolucionaremos en los próximos 50 años, sin remontarnos un intervalo equivalente en la historia de la controversia entre la conducta innata y la adquirida. El debate está cargado de visceralidad, pues cualquier postura que se adopte trae consigo graves implicaciones políticas. Las posiciones varían desde una infundada fe en la flexibilidad humana, sostenida por los reformistas, hasta una obsesión por la estirpe y la raza, que caracteriza a los conservadores. Estas posturas, cada una a su manera, han causado un incalculable sufrimiento a la humanidad durante los últimos cien años.

Aprendizaje e instinto

Hace medio siglo, las dos corrientes de pensamiento dominantes sobre el comportamiento animal y humano presentaban puntos de vista opuestos. Enseñando a los animales acciones arbitrarias, presionar una palanca por ejemplo, los conductistas norteamericanos llegaron a la conclusión de que todo comportamiento era el resultado de un aprendizaje realizado por ensayo y error. Este proceso se consideró tan universal, que las diferencias entre las especies se reputaron irrelevantes: el concepto de aprendizaje se aplicó a todos los animales, hombre incluido. Lo sentenció B. F. Skinner, fundador del conductismo: “Palomas, ratas, monos, ¿importa cuál sea uno u otro?”

Por contra, la escuela etológica europea se centró en el comportamiento innato. Cada especie animal nace con un número de patrones de conducta, que apenas sufren modificaciones por la acción del entorno. Estos y otros comportamientos propios de cada







2. Ambas posturas, llevadas al extremo, entrañan un grave riesgo. Recuérdese el determinismo biológico de los nazis y el determinismo social de los comunistas.

especie representan adaptaciones evolutivas. Así, nadie necesita enseñar a los humanos cómo reír o llorar: se trata de respuestas innatas, universalmente utilizadas y entendidas. De forma similar, tampoco la araña necesita aprender a construir su tela. Nace con una batería de hileras (tubos conectados a una glándula que produce seda), así como con un programa de comportamiento que le "enseña" a tejer los hilos.

Debido a su simplicidad, ambos planteamientos del comportamiento presentaban un enorme atractivo. Y aunque ambos aceptaban la teoría de la evolución, a veces su influencia era epidérmica. Los conductistas recalcaban la continuidad entre humanos y otros animales, atribuyendo dicho vínculo a la evolución. Pero, dado que para ellos el comportamiento se aprendía, no se heredaba, ignoraron el aspecto genético, sobre el que recae la evolución. Aunque es cierto que la evolución implica continuidad, también exige diversidad: cada animal se adapta a un determinado modo de vida en un determinado ambiente. Como se evidencia a partir de los tratados de Skinner, este punto se pasó por alto sin más.

Por su parte, algunos etólogos manejaban nociones harto imprecisas sobre la evolución, poniendo mayor énfasis en la filogenia que en la selección natural. Entendieron que la inhibición de la agresividad y otros aspectos del comportamiento eran beneficiosos para las especies. Argumentaban que si unos animales mataban a otros en luchas, la especie acabaría por extinguirse. Aunque eso podría ser cierto, los animales tienen razones egoístas para evitar una escalada de violencia que fuera dañina para ellos y para sus congéneres. De ahí que estas ideas se estén reemplazando por teorías que tratan sobre la manera en que ciertas pautas de comportamiento benefician al individuo y a los con él emparentados. Los efectos ejercidos sobre la especie en cuanto tal se consideran algo colateral.

El conductismo comenzó a tambalearse con el descubrimiento de que el aprendizaje difiere según las circunstancias y según la especie. Así, una rata vincula acciones y efectos sólo si ambos son consecutivos. El roedor tardaría mucho en aprender a presionar una barra si la recompensa se demorara unos minutos. Sin embargo, cuando éste ingiere comida que le provoca malestar, persistirá en su aversión por la comida aunque haya un retraso de horas entre la ingestión y la sensación negativa. Todo indica que los animales aprenden de forma selectiva, alcanzando su mayor habilidad en las contingencias que son más importantes para su supervivencia.

A la vez que los conductistas se vieron forzados a aceptar las premisas de la biología evolutiva y a tener en cuenta el mundo fuera del laboratorio, los etólogos y ecólogos fueron estableciendo las bases de la revolución neodarwinista de los años setenta. Se adelantó Nikolaas Tinbergen, etólogo holandés. Acometió brillantes experimentos de campo sobre la importancia de la supervivencia en el comportamiento animal. Así, explicó por qué muchas aves quitan las cáscaras de los huevos del nido tras la eclosión de los polluelos. La coloración de la parte externa del cascarón ejerce una función de camuflaje por mimesis, pero la interna no; los cuervos y otros depredadores podrían entonces locali-

zar el resto de la puesta si cáscaras rotas y huevos enteros se encontraran próximos. La remoción de los restos constituye una respuesta automática primada por la selección natural: las aves que practican este comportamiento cuentan con una progenie superviviente más numerosa.

Otros desarrollaron teorías para explicar comportamientos que, a primera vista, no parecen ayudar al sujeto actor, sino a otros. Obsérvese ese comportamiento "altruista" en las hormigas soldado, que dan su vida en defensa de la colonia, o en los delfines, que sacan a la superficie al compañero que se está ahogando. Los biólogos suponían que la selección natural admitiría la ayuda entre los parientes si con ello se perpetuaban los mismos genes. Si dos animales no estaban emparentados, el favor concedido por uno debería ser devuelto en un futuro.

Los científicos se sintieron tan seguros de sus explicaciones sobre la cooperación de las sociedades animales, que no se resistieron a generalizarlas a nuestra propia especie. Consideraron que la iniciativa solidaria de la sociedad se fundaba sobre la misma base que los valores de familia y transacción económica.

En 1975, Edward O. Wilson, experto norteamericano en hormigas, proclamó que había llegado el momento de aplicar la teoría de Darwin al comportamiento humano y que la sociología debería prepararse para trabajar, codo con codo con los biólogos, en dicho empeño. Hasta entonces, una y otra disciplina habían seguido trayectorias independientes, si bien desde el punto de vista de un biólogo la sociología no era mucho más que el estudio del comportamiento animal centrado en una sola especie: la nuestra. No siendo ésa la perspectiva del profesional de la sociología, las propuestas a favor de un marco unificado de trabajo no fueron bien recibidas. Cierto oponente destemplado de Wilson echó agua fría sobre la cabeza de éste, que acababa de dictar una conferencia. Por las razones que veremos la "sociobiología", denominación de la nueva síntesis de Wilson, fue equiparada con las persecuciones raciales del pasado y, en concreto, con el "Holocausto".

Aunque la crítica fue manifiestamente injusta —Wilson aportaba explicaciones evolutivas, no propuestas políticas—, a nadie debiera sorprender que la cuestión de la biología humana despierte grandes pasiones.

Cargas del pasado

Solía creerse que, por ser aprendida, parte del comportamiento humano podía cambiarse sin dificultad, en tanto que otra, heredada, se resistía a la modificación.

Ideólogos de todo cuño se han valido de esta división para defender la naturaleza innata de ciertas características humanas (presunta diferencia racial en punto a la inteligencia) y la plasticidad de otras (capacidad para superar los estereotipos entre sexos). De este modo, el comunismo se fundó sobre la base de una gran confianza en la maleabilidad humana. Puesto que las personas, a diferencia de los insectos sociales, son reacias a sacrificar su individualidad por el bien común, algunos regímenes acompañaron sus revoluciones con campañas de adoctrinamiento masivas. Pero resultó en vano. El comunismo se vino abajo debido a una estructura económica de incentivos que no hería la naturaleza humana. Por desgracia, esto sólo se produjo tras haber causado miseria y muerte.

Más desastrosa fue la convivencia entre la biología y el nazismo. Aquí, también, el pueblo (*das Volk*) se antepuso al individuo, pero en vez de apoyarse en la maquinaria social, se eligió el método de la manipulación genética. Se clasificaron las personas entre pertenecientes a un tipo "superior" y las de un tipo "inferior"; había que proteger al primero de la contaminación del segundo. En el horrible lenguaje de los nazis, un *Volk* sano requería la extirpación de todos los elementos "cancerosos". Esta idea fue llevada al extremo de forma tal, que la civilización occidental se ha comprometido a no olvidarlo nunca.

Pero no se crea que la ideología seleccionista subyacente se restringió a esa época y lugar. En la primera parte del siglo XX, el movimiento eugenésico —que perseguía la mejora de la humanidad por medio del cruce entre los "mejor adaptados"— gozaba de gran predicamento entre los intelectuales de Estados Unidos y Gran Bretaña. Con un punto de apoyo en ideas que se remontaban a la *República* de Platón, se aceptaba por buena la esterilización de los discapacitados mentales y de los criminales. Y el darwinismo social —tesis según la cual en una economía capitalista no intervencionista el fuerte dejará fuera de la competencia al débil, redundando en una mejora general de la población— inspira todavía hoy determinadas políticas. En esa línea, no deberíamos ayudar a los pobres en su lucha por la subsistencia para no perturbar el orden natural.

Con semejantes proclamas, se comprende que las clases oprimidas —minorías y mujeres— no vean un aliado en la biología. Pero yo afirmaría que el peligro puede venir de ambas direcciones, del determinismo biológico y de su antagonista, es decir, el rechazo de las necesidades básicas humanas y la creencia de que podemos ser lo que nos propongamos. Las comunas "hippies" de los sesenta, los kibutzim de Israel y la revolución feminista persiguieron redefinir la humanidad. Sin embargo, sólo perdurará el rechazo a los celos sexuales, al vínculo entre padres e hijos o a las diferencias entre los sexos hasta que un movimiento en contra intente equilibrar las tendencias culturales y las inclinaciones humanas.

Hoy, mientras el genocidio de la Segunda Guerra Mundial se desvanece en el recuerdo, se nos ofrecen pruebas abundantes de la



3. Con nuestros parientes animales más próximos —como esta familia de bonobos— compartimos muchos comportamientos. Los programas televisivos sobre naturaleza han traído hasta nuestros hogares la influencia de la biología en el comportamiento humano.

conexión entre genética y comportamiento. Los estudios realizados con gemelos que han crecido separados han llegado a ser de conocimiento general, y no hay semana sin que los periódicos se hagan eco de un nuevo gen humano. Está documentado el origen genético de la esquizofrenia, la epilepsia y la enfermedad de Alzheimer e incluso de comportamientos habituales tales como temblar de miedo. Conocemos mejor las diferencias genéticas y neurológicas entre varones y mujeres, entre homosexuales y heterosexuales. Se sabe que una pequeña región del cerebro de los varones transexuales (que se visten y comportan como mujeres) se asemeja a la misma región del cerebro de la mujer.

La lista de estos avances científicos aumenta por días y genera una acumulación crítica de pruebas imposibles de ignorar. Es comprensible que los estudiosos que han dedicado su vida a condenar la idea de una influencia de la biología en el comportamiento humano se resistan a cambiar. Pero se quedan atrás, superados por el público, que parece haber aceptado la intervención de los genes en cuanto hacemos y somos. Al propio tiempo, las reticencias a las comparaciones con otros animales se han disipado gracias al torrente de programas y documentales sobre la naturaleza, que han traído a nuestros hogares la vida salvaje y nos han mostrado a los animales un poco más inteligentes e interesantes de lo que la gente creía.

Los estudios sobre chimpancés y bonobos, como los realizados por Jane Goodall y el autor, ponen de manifiesto que existen paralelismos entre innumerables prácticas y capacidades humanas (desde la política y la educación de los niños hasta la violencia e incluso la moral) y la vida de nuestros parientes animales más cercanos. ¿Cómo podemos mantener los dualismos del pasado —entre humanos y animales y entre cuerpo y mente— ante tamaños indicios en contra? El actual conocimiento sobre nuestros antecedentes biológicos no permite un retorno a las ideas del pasado.

No obstante, esto no resuelve el problema del abuso ideológico. Si acaso, empeora las cosas. Mientras la gente tenga compromisos políticos, se describirá la naturaleza humana de una u otra manera de acuerdo con sus propios intereses. A los conservadores les gusta señalar el aspecto egoísta de la naturaleza humana, mientras que los liberales sostienen que hemos evolucionado para ser sociales y solidarios. La evidente exactitud de ambas deducciones muestra lo erróneo del ingenuo determinismo genético.

Lo mejor de ambos mundos

Dado que el lenguaje genético se ha introducido en nuestra cultura de términos pegadizos, hay muchas razones para mostrar al público que los genes, por ellos mismos, son como semillas esparcidas sobre el pavimento: incapaces de dar fruto alguno. Cuando los científicos dicen de un rasgo que es heredado, lo que quieren indicar es que parte de su variabilidad se explica por factores genéticos. Mas tiende a olvidarse que los factores ambientales suelen explicar otro tanto.

Como Hans Kummer, un primatólogo suizo, señaló hace años, intentar determinar qué fracción de un rasgo se debe a los genes y qué fracción al entorno, es tan inútil como preguntarse si el sonido de un tambor que retumba lejano lo produce el percusionista o el instrumento. Por otro lado, si recogemos distintos sonidos en diferentes ocasiones, podemos preguntarnos con razón si la variación se debe a diferentes percusionistas o a distintos tambores. Esta es la pregunta que la ciencia se formula cuando aborda la relación entre efectos genéticos y ambientales.

Preveo un estrechamiento de los lazos entre genética y comportamiento, un conocimiento mucho más preciso de las funciones cerebrales y una adopción gradual de los modelos evolutivos en las ciencias sociales. Por fin, el retrato de Charles Darwin terminará por presidir los departamentos de sociología y psicología. Pero cabría esperar que todo esto fuera acompañado de una continua valoración de las implicaciones éticas y políticas de la ciencia de la conducta.

Tradicionalmente, los científicos han actuado como si no fuera asunto suyo el uso que se haga de la información que proporcionan. Ha habido períodos en que han tomado incluso parte activa en políticas abusivas. Una notable excepción fue Albert Einstein, quien pudiera servir de modelo del tipo de conciencia moral que se requiere en ciencias sociales y del comportamiento. Si algo nos enseña la historia, es la importancia de permanecer alerta ante malas interpretaciones y simplificaciones. Nadie se halla en mejor posición que los propios científicos para advertirnos contra las distorsiones y para explicar los conceptos complejos.

La dirección en la que el pensamiento podría desarrollarse quizá se ilustre con un ejemplo extraído del cruce de caminos donde coinciden la antropología cultural y evolutiva. Sigmund

Freud y muchos antropólogos tradicionales, Claude Lévi-Strauss entre ellos, han aceptado que el tabú del incesto humano sirve para suprimir el impulso sexual entre miembros de una misma familia. Freud creía que “las primeras fantasías sexuales en los humanos eran siempre de carácter incestuoso”. De ahí que el tabú del incesto se viera como la victoria definitiva de la cultura sobre la naturaleza.

En el polo opuesto, Edward Westermarck, un sociólogo finés contemporáneo de Freud, postulaba que el trato familiar en edades tempranas (el que se da entre madre e hijo o entre hermanos) mataba el deseo sexual. En su opinión, entre individuos que han crecido juntos apenas encontramos, si es que la encontramos, atracción sexual. Westermarck, darwinista convencido, lo atribuía a un mecanismo adquirido por evolución e ideado para evitar las consecuencias perniciosas de la endogamia.

En el mayor estudio a gran escala realizado sobre este tema hasta la fecha, Arthur P. Wolf, antropólogo de la Universidad de Stanford, examinó las historias matrimoniales de 14.400 mujeres. Llevó a cabo su “experimento natural” en Taiwan. Las familias de ese país adoptaban y criaban las futuras nueras, lo que indicaba que se buscaban maridos con los que se había crecido juntos desde la niñez. Wolf comparó esos matrimonios con los formados entre hombres y mujeres que no se conocían hasta el día de su boda. Tomando el número de divorcios y la tasa de natalidad como medidas, respectivamente, de la felicidad matrimonial y de la actividad sexual los resultados respaldaban el efecto Westermarck: la convivencia desde los primeros años de vida comprometía manifiestamente la compatibilidad matrimonial en la edad adulta. Los primates están sujetos al mismo mecanismo. Muchos primates evitan la endogamia a través de la migración de un sexo o del otro al llegar a la pubertad. El sexo que emigra conoce nuevos compañeros con los que no se ha relacionado, mientras que el sexo residente gana diversidad genética del exterior. Además, los parientes cercanos que permanecen en el mismo entorno, suelen evitar las relaciones sexuales.

En los años cincuenta, Kisaburo Tokuda observó el mismo fenómeno en un grupo de macacos japoneses del zoo de Kyoto. Cierto joven macho que había ascendido al rango superior de la jerarquía, utilizó sus privilegios sexuales copulando frecuentemente con todas y cada una de las hembras excepto con una: su madre. No se trataba de ningún caso aislado. Las cópulas madre-hijo se encuentran reprimidas en todos los primates. Incluso entre los bonobos —a buen seguro, los primates de mayor actividad sexual sobre la faz de la Tierra— semejante acoplamiento es rarísimo, si no inexistente. La anulación del incesto ha quedado ya demostrada en numerosos primates; se admite que el mecanismo responsable es la relación de familiaridad en edad temprana.

El efecto Westermarck sirve de escaparate del enfoque darwinista aplicado al comportamiento humano. Por la sencilla razón de que esa hipótesis se apoya en una combinación de factor genético y factor educacional. El cuadro consta de un componente de desarrollo (aversión sexual aprendida), un componente innato (el efecto de los vínculos familiares a temprana edad), un componente cultural (algunas culturas crían juntos niños sin mutua relación de parentesco, otras crían, separados, hermanos de distinto sexo, pero la mayoría de las familias se organizan de tal manera, que automáticamente se crean inhibiciones sexuales entre parientes), una adecuada razón evolutiva (supresión de la endogamia) y paralelismos directos con el comportamiento animal. Corona todos esos componentes el tabú cultural, exclusivo de nuestra especie. Sería bueno saber si el tabú del incesto sirve sólo para formalizar y fortalecer el efecto Westermarck o si añade una dimensión de nuevo cuño.

La inesperada riqueza de un programa de investigación que integra el desarrollo, la genética, la evolución y la cultura al abordar un fenómeno circunscrito, demuestra cuánto se gana con la supresión de viejas barreras entre las disciplinas. En el futuro, cabe presumirlo, el enfoque evolutivo del comportamiento humano adquirirá un refinamiento progresivo, pues irá incorporando de una manera explícita la flexibilidad cultural. Por tanto, la dicotomía de los dos planteamientos tradicionales, el aprendizaje o el instinto, cederá paso a una perspectiva integradora. Mientras tanto, los estudiosos del comportamiento animal se interesarán más por los efectos que el entorno ejerce sobre el comportamiento y, de forma especial —en primates y mamíferos marinos—, en la posibilidad de transmisión cultural de información y costumbres. Hay comunidades de chimpancés que usan piedras para cascar nueces en la selva, mientras que otras comunidades tienen a su alcance las mismas nueces y piedras, y parece que no sepan qué hacer con ellas. Para explicar esa disparidad no podemos apelar a la variación genética.

Más que mirar la cultura como antítesis de la naturaleza, obtendremos un conocimiento más profundo del comportamiento humano provocando silenciosamente el olvido del viejo debate factor genético/factor educacional.

EL AUTOR



FRANS B.M. DE WAAL se especializó en zoología y etología de tradición europea en su país natal, Holanda. Trabaja ahora en el Centro Regional Yerkes de Investigación sobre Primates en Atlanta y enseña comportamiento primate en el departamento de psicología en la Universidad de Emory. Le interesan las interacciones sociales en los primates, así como los orígenes de la moral y de la justicia en la sociedad humana.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SEXUAL ATTRACTION AND CHILDHOOK ASSOCIATION: A CHINESE BRIEF FOR EDWARD WESTERMARCK. Arthur P. Wolf. Stanford University Press, 1995.

THE MISMEASURE OF MAN. Stephen Jay Gould. W. W. Norton, 1996.

GOOD NATURED: THE ORIGINS OF RIGHT AND WRONG IN HUMANS AND OTHER ANIMALS. Frans de Waal. Harvard University Press, 1997.

Influencia del hombre sobre el clima

¿Cuánta alteración causamos en el clima? La anhelada respuesta puede llegar hacia el año 2050, pero sólo si todas las naciones del mundo se comprometen desde ahora a una vigilancia a largo plazo

Thomas R. Karl y Kevin E. Trenberth

"Las pruebas recabadas sugieren que el hombre influye de una forma apreciable sobre el clima global." Con estas mesuradas palabras, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), financiado por la Organización Meteorológica Mundial y el Programa Ambiental de las Naciones Unidas, reconocía en 1995 que los seres humanos no eran en absoluto consecuentes en lo concerniente a la salud del planeta. Lo que el panel no precisó —y lo que científicos y políticos discuten acaloradamente— es cuándo, dónde y cuánto se ha notado y se notará esa influencia.

Hasta ahora, los cambios climáticos presuntamente relacionados con la actividad humana han sido bastante modestos. Pero las previsiones de varia índole sugieren que el cambio alcanzará una intensidad espectacular hacia mediados del siglo XXI, sobrepasando cuanto se ha visto en la naturaleza en los últimos 10.000 años. Aunque algunas regiones pudieran beneficiarse durante cierto tiempo, cabe esperar que, en conjunto, las alteraciones resultarán perjudiciales e incluso catastróficas. Si la ciencia pudiera determinar la cuantía en que ciertas actividades influyen sobre el clima, se encontraría en mejor situación a efectos de recetar remedios para las peores alteraciones. ¿Es posible tal cuantificación? Creemos que sí. Nos parece que puede lograrse hacia el año 2050, pero sólo a condición de que este objetivo se convierta en prioridad internacional permanente.

Pese a la incognoscibilidad inevitable de los pormenores del cambio climático, es patente que la acción humana incluye en la atmósfera de formas diversas y preocupantes. La combustión de carburantes fósiles en centrales térmicas y automóviles expulsa partículas y gases que alteran la composición de la atmósfera. La contaminación visible, debida a combustibles ricos en azufre incluye aerosoles, partículas micrométricas que crean un cielo de panza de burra. Al reflejar parte de los rayos solares hacia el espacio, estos aerosoles enfrían la atmósfera; de un modo transitorio, pues sólo permanecen en el aire algunos días, hasta que la lluvia los barre y los deposita en

la superficie del planeta. Algunos gases invisibles producen un impacto más prolongado. En la atmósfera el dióxido de carbono puede persistir más de un siglo. Y lo que es peor, estos gases de invernadero aprisionan una fracción de la radiación infrarroja que en condiciones normales se reemitiría al espacio, creando por contra una “manta” que aísla y calienta la parte inferior de la atmósfera.

Por sí solas, las emisiones de combustibles fósiles han incrementado la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera en un 30 por ciento desde el comienzo de la Revolución Industrial, en la segunda mitad del siglo XVIII. Los océanos y las plantas ayudan a paliar esta aportación extrayendo del aire una parte de las mismas, pero las concentraciones de dióxido de carbono continúan aumentando. Del bombeo constante de gases de invernadero a la atmósfera resulta, inevitable, el calentamiento global. Por eso, la mayoría de los científicos están de acuerdo en que la temperatura media de la Tierra ha subido al menos 0,6 grados Celsius a lo largo de los últimos 120 años, por culpa, en buena medida, de la quema de combustibles fósiles.

Al evaporar agua de los océanos, suelos y plantas, el calentamiento global promovido por el efecto invernadero seca el planeta. Esa humedad adicional de la atmósfera proporciona un depósito mayor de agua que aprovechan todos los sistemas meteorológicos capaces de producir precipitación, desde las tempestades tropicales hasta los chubascos tormentosos, pasando por los temporales de nieve o frentes de lluvia. Con semejante refuerzo del ciclo del agua, se producen sequías más pertinaces en las regiones secas y se generan lluvias o nevadas de sorprendente intensidad en las regiones húmedas, con el riesgo consiguiente de inundaciones. Tales fenómenos meteorológicos se han abatido sobre muchas zonas del mundo en los últimos decenios.

Al margen de la combustión de carburantes, otras actividades humanas pueden causar estragos en los sistemas climáticos. Así, la conversión de bosques en campos de labor elimina árboles que absorberían dióxido de carbono de la atmósfera y reducirían el efecto de invernadero. Menos árboles también signi-



1. Un peatón de la ciudad de Nueva York trata de defenderse de la lluvia torrencial producida por el huracán Floyd, que se desató en septiembre de 1999. Las lluvias torrenciales asociadas a las tempestades tropicales empeoran con el calentamiento global. Pero no son las únicas catástrofes derivadas del mismo.

fica mayor escorrentía del agua de lluvia, lo que redobla el peligro de inundaciones.

No basta con identificar los factores que fomentan el cambio climático. Importa llegar a conocer qué efectos tendrá en el clima local y global la acción del hombre en un lugar determinado. Para lograr este objetivo, los expertos deberán ser capaces de construir modelos climáticos harto más precisos. Necesitaremos, por tanto, la potencia técnica de superordenadores un millón de veces más rápidos que los que manejamos ahora. Tendremos también que desenredar la madeja de interacciones que median entre océanos, atmósfera y biosfera para saber exactamente qué variables introducir en los modelos informáticos.

La simulación y la predicción climática sólo alcanzarán su mayoría de edad cuando se disponga de un archivo continuo de la sucesión de cambios.





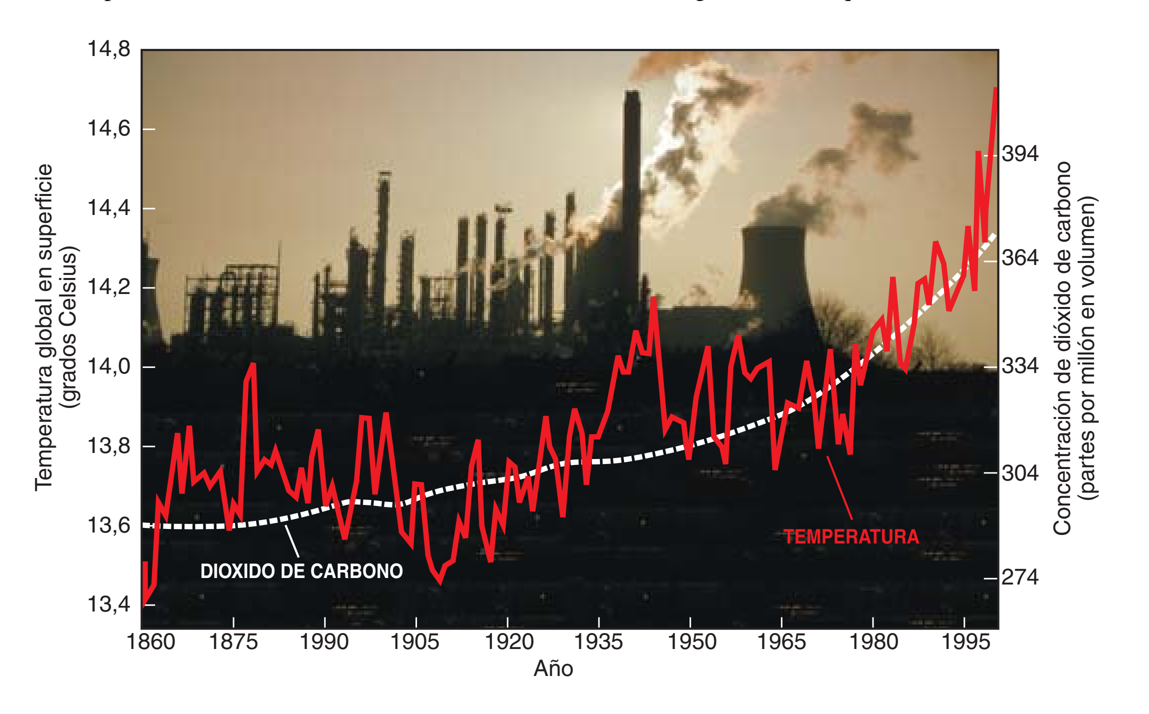
Se nos pedirá, sobre todo, demostrar que nuestros modelos simulan con exactitud los cambios climáticos pasados y presentes, antes de confiar en esos constructos para predecir el futuro. Ello requiere contar con archivos y registros que cubran plazos largos. La simulación y predicción del clima entrarán en su mayoría de edad sólo cuando se disponga de un registro fiel de los cambios a medida que van sucediendo.

Los ordenadores y las interacciones climáticas

Para quienes elaboran modelos climáticos, todo tiene su interés: desde el inicio, apogeo y desaparición de las glaciaciones hasta la desertización de Africa Central; todo cumple una función en los modelos de superordenador. Las interacciones entre los componentes del sistema climático —la atmósfera, los océanos, los continentes, los hielos marinos, los cursos de agua dulce y la biosfera— siguen leyes físicas representadas por docenas de ecuaciones matemáticas. Los modelizadores instruyen a los ordenadores para que resuelvan estas ecuaciones en cada uno de los bloques de una red tridimensional que abarca el globo. Puesto que la naturaleza no está sujeta a bloques, importa, amén de incluir las expresiones matemáticas correctas en cada uno de ellos, describir también el intercambio de masa y energía que experimentan los bloques en cuestión.

En los principales centros mundiales de modelización del clima se emplean ordenadores que ejecutan entre 10.000 y 50.000 millones de operaciones por segundo. Mas, con tantas variables en evolución, se tardan meses en realizar la simulación de un solo siglo. Así, el tiempo que se invierte en construir una simulación limita la resolución (número de bloques) que se puede incluir en los modelos climáticos. En los modelos típicos elaborados para reproducir la evolución detallada de los sistemas meteorológicos, los bloques de la red tridimensional miden unos 250 kilómetros de lado en el plano horizontal y un kilómetro en la vertical. De donde se desprende cuán difícil resulta seguir la pista a los sistemas dentro de regiones más restringidas.

Ni siquiera el modelo global más refinado hoy en uso puede acometer una simulación directa de la nubosidad (porción de cielo cubierto por nubes), la formación de lluvia o condiciones similares. Las potentes nubes tormentosas que desencadenan chubascos torrenciales suelen tener dimensiones inferiores a los 10 kilómetros, y las gotas de lluvia se condensan en tamaños submilimétricos. Puesto que cada uno de esos sucesos tiene lugar en una región menor que el volumen de la



2. La combustión de carburantes fósiles (*fotografía*) ha incrementado las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono (*trazos blancos*) y ha elevado la temperatura global en superficie, durante los últimos 140 años (*línea roja*).

menor unidad de la red, hemos de inferir sus características mediante complicadas técnicas estadísticas.

Tales fenómenos meteorológicos a pequeña escala se desarrollan al azar. Sucesos aleatorios cuya frecuencia difiere notablemente de un punto a otro. Pero la mayoría de los agentes que alteran el clima, piénsese en el aumento de la concentración de los gases de invernadero, afectan a todas las regiones del planeta de una manera más uniforme. Cuanto menor sea la región considerada, tanto más la variabilidad del tiempo enmascarará la actividad climática a gran escala. En quitar esa máscara se consume tiempo de ordenador, pues se obliga a efectuar diversas simulaciones, cada una con condiciones de partida ligeramente diferentes. Los rasgos climáticos que se dan en cada simulación constituyen la "información" climática, mientras que los no reproducibles se consideran "ruido" climático dependiente de la temperie.

Según estimaciones prudentes, la velocidad de procesamiento de los ordenadores se habrá multiplicado en más de un millón de veces hacia el año 2050. Con semejante potencia de cálculo, los expertos en modelación podrán abordar muchas simulaciones a partir de condiciones iniciales diferentes y separar mejor la información climática del ruido. También podrían llevarse a cabo de forma rutinaria simulaciones más dilatadas, de cientos de años, con resolución horizontal inferior a un kilómetro cuadrado y una resolución vertical media de 100 metros en los océanos y la atmósfera.

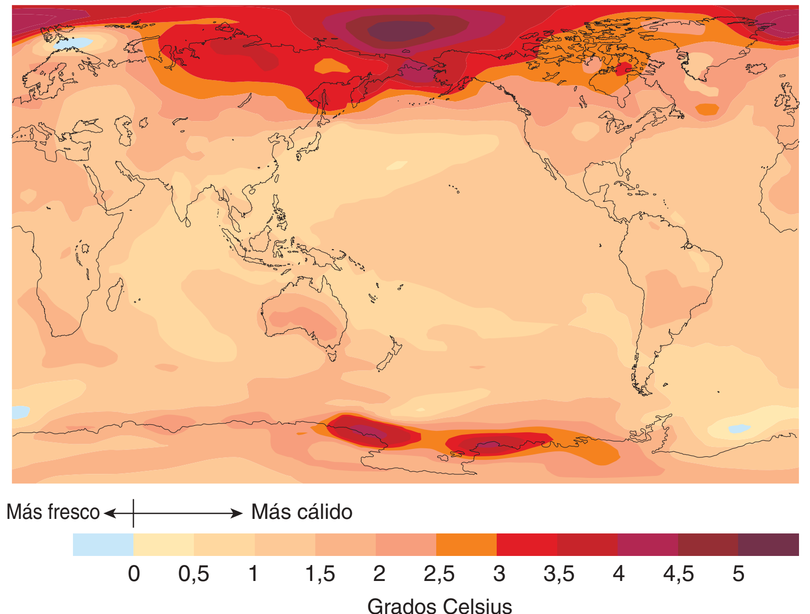
Los ordenadores ultrarrápidos ayudan a predecir el cambio climático sólo si las ecuaciones matemáticas que se introducen en ellos describen bien qué sucede en la naturaleza. Demos un ejemplo: si un modelo de atmósfera se simula cuatro grados Celsius demasiado fría (cosa no demasiado infrecuente hace un decenio), la simulación indicará que la atmósfera puede alojar alrededor de un 20 por ciento menos de agua que su capacidad real, un error importante que provoca que las subsiguientes estimaciones de evaporación y precipitación pierdan todo sentido. Otra dificultad es que no sabemos todavía cómo reproducir adecuadamente todos los procesos que influyen sobre el clima; así, las interrupciones temporales en el ciclo del carbono o las modificaciones operadas en el uso de los suelos. Y lo que es peor, esos cambios pueden iniciar ciclos de realimentación que, de no tenerlos en cuenta, arruinan el modelo. Por ejemplo, la elevación de temperatura refuerza a veces otra variable (el contenido de vapor de agua de la atmósfera) que, a su vez, amplifica la perturbación original. (En este caso, una mayor humedad en el aire induce un calentamiento mayor porque el vapor de agua es un potente gas de invernadero.)

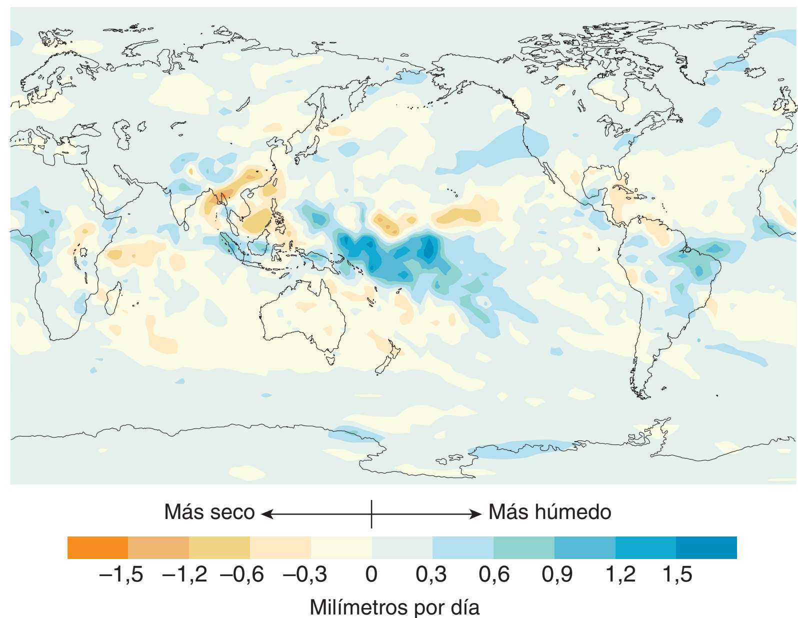
Sólo ahora se está empezando a tomar en consideración la cuantía de la influencia de tales realimentaciones positivas en el vital ciclo del carbono del planeta. Recuérdese, a este respecto, que la erupción en 1991 del monte Pinatubo, en Filipinas, arrojó a la atmósfera suficientes cenizas y dióxido de azufre para causar un enfriamiento global transitorio a medida que esos compuestos reaccionaban con gotitas de agua en el aire y bloqueaban parte de la radiación solar incidente. Bastaba esa merma de energía para inhibir la absorción de dióxido de carbono por las plantas.

Los cambios operados en el uso de los suelos pueden perturbar los sistemas climáticos regionales y continentales de una manera difícil de traducir en ecuaciones. La tala de bosques para el laboreo o la cría de ganado

CAMBIO CLIMATICO HACIA EL AÑO 2050







3. Un calentamiento global de hasta cinco grados Celsius (*arriba*) podría incrementar la precipitación (*abajo*) en gran parte del mundo hacia mediados del siglo XXI. Las simulaciones ilustradas usan estimaciones del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático para las emisiones de gases de invernadero y aerosoles de azufre entre los años 2000 y 2050.



4. La deforestación altera el clima en más de un aspecto. Por culpa de la tala, el bosque pierde capacidad de absorber dióxido de carbono del aire. Los bosques, de color oscuro, absorben más energía solar y mantienen la región más caliente y húmeda que las zonas de color claro.

deja expuesta la superficie. Las tierras de cultivo tienen un color más claro que los oscuros bosques y, por tanto, reflejan más radiación solar, lo que tiende a enfriar la atmósfera, sobre todo, en verano y otoño.

Pobreza de datos

Sin observaciones rigurosas, susceptibles de comprobación y que muestren que los modelos reflejan la realidad, las simulaciones del clima no serían más que brillantes conjeturas. Dicho de otro modo, para disipar nuestra ignorancia en torno a la sensibilidad del sistema climático a la actividad del hombre, necesitamos saber los cambios operados por el clima en el pasado. Se ha de poder simular adecuadamente las condiciones climáticas anteriores a la Revolución Industrial y, sobre todo desde esa época, cuando la acción humana ha alterado de forma irreversible la composición de la atmósfera.

Para conocer el clima que hubo antes del advenimiento de los satélites meteorológicos y otros instrumentos, nos basamos en diversos indicadores: burbujas de aire y sustancias químicas atrapadas en testigos de hielo, anchura de los anillos de los árboles, crecimiento del coral y depósitos de sedimentos en el fondo de océanos y lagos. Son instantáneas que, ensambladas, nos proporcionan información para reconstruir las condiciones del pasado. Mas, para una comprensión cabal del clima hoy no bastan fotos fijas de magnitudes físicas, químicas y biológicas; se requiere una suerte de larga cinta de vídeo que registre la evolución actual del clima. Entre las variables a contemplar recordemos la medición continua de hielos marinos, del manto de nieve, de la humedad del suelo, de la cubierta vegetal y de la temperatura y salinidad de los mares.

Frente a ello, el panorama presente resulta desolador. Ninguna institución norteamericana ni internacional posee el mandato ni los recursos para seguir la evolución del clima a largo plazo. A los expertos no les queda otro remedio que compilar sus interpretaciones del cambio climático a partir de grandes redes de satélites y sensores de superficie (boyas, buques, observatorios, estaciones meteorológicas y aviones), que cumplen otras funciones, la predicción del tiempo a corto plazo por ejemplo. Por eso, el cuadro de la variabilidad climática del pasado que se obtiene peca a menudo de inexacto, caso de que exista.

La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, ente federal estadounidense, tiene en funcionamiento muchas de esas redes, pero no dispone de los recursos necesarios para comprometerse en un programa a largo plazo de vigilancia del clima. Aunque prevé el lanzamiento de satélites dotados de los últimos avances para inspección de varios aspectos de sistemas globales, ni siquiera el proyectado Sistema de Observación Terrestre de la NASA incluye entre sus objetivos la continuidad requerida de un programa de observación del clima a largo plazo.

Cualquiera que sea el estado del seguimiento del clima, habrá que superar en el nuevo decenio otro obstáculo, a saber, el de asegurar que las magnitudes que medimos representen en verdad cambios de varias décadas en el entorno. Con otras palabras: ¿qué ocurre si usamos una nueva cámara o apuntamos en diferente dirección? La vida útil de un satélite típico dura unos cuatro años, antes de sustituirlo por otro que ocupará una órbita distinta. El que lo reemplaza porta, por lo general, nuevos instrumentos y observa la Tierra a una hora diferente del día. Por tanto, con los años acabamos midiendo no sólo la variabilidad climática, sino también los cambios introducidos por el hecho de observar el clima desde una atalaya distinta. A menos que se tomen, pues, precauciones

para cuantificar las modificaciones asociadas a las técnicas de observación y se adopten métodos de muestreo antes de reemplazar el viejo armamentario, el archivo de observaciones climáticas podría quedar inservible porque no habría forma de comparar los nuevos datos con los precedentes.

Los científicos del futuro estarán preparados para evaluar las simulaciones climáticas con datos precisos debidamente archivados. Pero los datos que satélites y sensores críticos de superficie han ido recogiendo corren el peligro de perderse para siempre. Es algo habitual que las observaciones de superficie a largo plazo se registren todavía en anticuadas cintas de papel perforadas o se almacenen en hojas (que se deterioran con el tiempo) o en soportes informáticos caducos. Por ceñirnos a Estados Unidos, la mitad de los datos de los nuevos radares Doppler se pierden porque el sistema de registro deja en manos de los operadores la decisión de conservar los datos durante fenómenos catastróficos, cuando los avisos y otras funciones vitales constituyen la preocupación inmediata.

¿Qué prever?

Si ponemos empeño, de aquí a 50 años comprenderemos, en líneas generales, la influencia del hombre en las características globales, regionales e incluso locales del clima. Pero demorar hasta el último momento para poner manos a la obra sería una temeridad. Los largos tiempos de residencia del dióxido de carbono y otros gases de invernadero en la atmósfera, conjugados con la respuesta lenta del clima a condiciones cambiantes, supondrán que, aun cuando cortásemos en seco toda actividad perjudicial, el planeta habrá de experimentar un cambio importante.

La fusión de los glaciares de los altiplanos andinos y de otras zonas corrobora el calentamiento real del planeta. El ascenso del nivel del mar —y la sumersión de costas— respaldan el calentamiento global previsto, de tal vez dos grados Celsius o más, hacia fines del siglo XXI. No cabe duda que el cambio climático recabará la máxima atención cuando sus efectos agudicen otras presiones ejercidas sobre la sociedad. Uno de los primeros problemas con que muy probablemente tendremos que enfrentarnos será la proliferación de asentamientos humanos en regiones costeras y zonas bajas vulnerables a las inundaciones. No es el único. Ahora bien, mientras la sociedad pueda apoyarse en falta de un conocimiento evidente de la influencia de la actividad humana sobre el clima, asistiremos a una dura oposición contra leyes restrictivas de la deforestación y de las emisiones por combustión de carburantes fósiles.

La necesidad de resolver y anticipar cuánto influimos sobre nuestro mundo constituye un argumento de peso para no retrasar ni un minuto más el desarrollo de sistemas exhaustivos de observación y recogida de datos. Con esa información se elaborarían modelos fidedignos de la evolución del clima a varios años vista. Asistidos por una planificación adecuada, podríamos proyectar presas y pantanos capaces de absorber las inundaciones que se anticipan; sabríamos también la cuantía en que las emisiones de gases de invernadero de nuevas centrales térmicas calentarían el planeta.

El cambio climático ha empezado ya. Podemos intervenir para frenarlo y hacerlo con buen sentido y criterio. Pero de momento no hemos dado ningún paso. Para prever la situación real del clima futuro, se han de superar los obstáculos señalados. No entraña especial dificultad subvenir a las necesidades de mayor potencia de cálculo y desentrañar las interacciones climáticas en sus mínimos detalles. El auténtico problema estriba en comprometerse en la vigilancia del clima global a largo plazo. ¿Cómo conseguir que los gobiernos asignen fondos y recursos para decenios de vigilancia, cuando el poder cambia de manos con tanta frecuencia?

Si deseamos estar en condiciones de predecir los efectos antropogénicos en el clima para el año 2050 —y comenzar a arreglar el desbarajuste de nuestro ambiente— debemos emprender otro camino. Contamos con una herramienta para abrir esa senda: el Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, firmado por el presidente George Bush en 1992. El convenio obliga a 179 gobiernos a poner coto a las actividades que redunden en perjuicio del clima. La alianza dio un paso hacia la estabilización de gases de invernadero al elaborar el Protocolo de Kyoto en 1997, pero los sistemas de vigilancia a largo plazo continúan en punto muerto.

LOS AUTORES



THOMAS R. KARL dirige, desde 1998, el norteamericano Centro Nacional de Datos Climáticos, en Asheville, el mayor archivo de datos climáticos del mundo, integrado en la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica. Karl ha centrado gran parte de sus investigaciones en tendencias climáticas y tiempos extremos.



KEVIN E. TRENBERTH dirige la sección de análisis climático en el Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas en Boulders, donde estudia el fenómeno de El Niño y la variabilidad climática. Después de varios años en el Servicio Meteorológico de Nueva Zelanda, fue profesor de ciencias atmosféricas en la Universidad de Illinois en 1977.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

GLOBAL WARMING: IT'S HAPPENING. Kevin E. Trenberth en *naturaLSCIENCE*, vol. 1, artículo 9, 1997. Puede consultarse en naturalscience.com/ns/articles/01-09/ns/_ket.html en la World Wide Web.

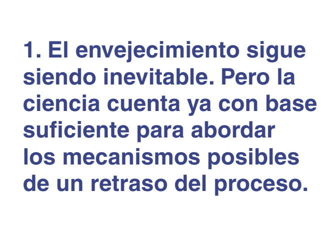
ADEQUACY OF CLIMATE OBSERVING SYSTEMS, 1999. Commission on Geosciences, Environment, and Resources. National Academy Press, 1999. Puede consultarse en www.nap.edu/books/0309063906/html/ en la World Wide Web.

CLIMATE CHANGE AND GREENHOUSE GASES. Tamara S. Ledley et al. En EOS, vol. 80, n.º 39, páginas 453-458; 28 sept. 1999. Puede consultarse en www.agu.org/eos_elec/99148e.html en la World Wide Web.

¿Podemos retardar el envejecimiento?

Michael R. Rose

Si bien es posible en teoría, no se conseguirá con ningún elixir. Los futuros tratamientos contra el envejecimiento tendrán que contrarrestar simultáneamente muchos procesos bioquímicos degenerativos

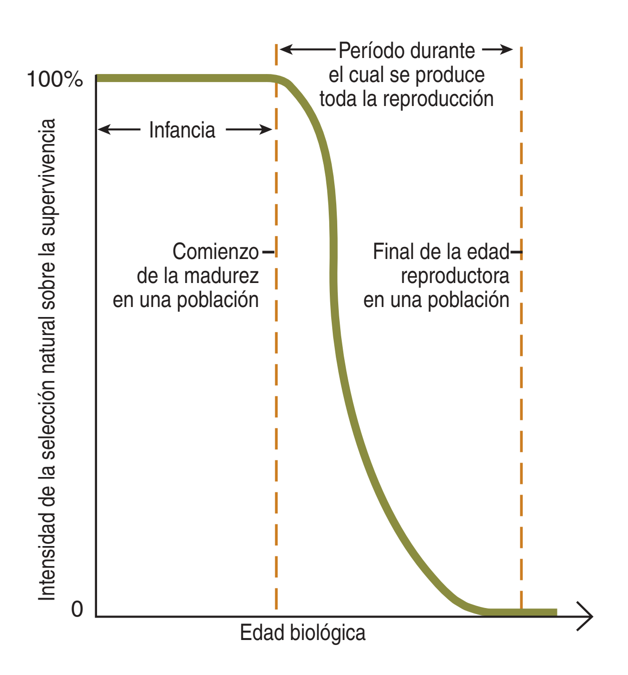


1. El envejecimiento sigue siendo inevitable. Pero la ciencia cuenta ya con base suficiente para abordar los mecanismos posibles de un retraso del proceso.

A lo largo de la historia, todas las culturas han aspirado a retrasar el envejecimiento, prolongando las energías o capacidades y la vida misma. En la actualidad, las dietas macrobióticas, las hormonas de moda entre los ancianos, prácticas sanitarias hindúes recicladas y otras supercherías siguen atizando la llama de la esperanza. Todos estos intentos por restaurar o mantener el vigor juvenil sólo tienen una cosa en común: no consiguen su objetivo. Las personas que cumplen los 65 sólo tienen una probabilidad ligeramente mayor que hace 2000 años de disfrutar de una vejez vigorosa.

Los investigadores en medicina han ideado terapias útiles para tratar trastornos cuya frecuencia se incrementa con la edad, así el cáncer y las cardiopatías. En los últimos 120 años, los sistemas de salud pública y los fármacos que combaten enfermedades infecciosas han elevado la esperanza de vida en las naciones desarrolladas al reducir los fallecimientos prematuros. Pero nada puede retrasar ni frenar los procesos naturales que hacen envejecer a los adultos y mermar su actividad fisiológica con los años. La cura de una enfermedad a una edad avanzada suele significar que otro problema relacionado con la vejez ocupará en breve su lugar. Los achaques siguen siendo el sino de los mayores de ochenta años, por mucho que los medios de comunicación ensalcen a los corredores de maratón nonagenarios.





2. La biología evolutiva explica por qué envejecemos. En las poblaciones que se reproducen por vía sexual, la selección natural sobre la supervivencia pierde fuerza al entrar en la madurez. El envejecimiento ha evolucionado conforme los genes que producían efectos deletéreos en edades avanzadas encontraban poca o nula oposición por parte de la selección natural y, por tanto, se propagaban en el acervo genético.

Con ello no debe entenderse que siempre nos estará vedado retrasar el envejecimiento. Desde 1980 muchas investigaciones han realizado la hazaña con animales, aunque por métodos que no pueden aplicarse a los seres humanos. La situación en la que se encuentra hoy la investigación sobre el envejecimiento recuerda la que presentaba la física atómica en 1929. Por entonces los físicos habían descubierto fuerzas cuánticas que antes ni imaginaban. Pero, ¿podrían domeñarlas? Esa era la cuestión.

> ¿Qué hay más allá del primer aplazamiento significativo del envejecimiento humano? Más aplazamiento. **El retraso de la senescencia no es un objetivo del todo o nada**, como llevar el hombre a la Luna.

La investigación sobre el envejecimiento ha experimentado grandes progresos; mas, ¿ha avanzado lo suficiente para postergar años de achaques?

Todavía no. Para conseguir este objetivo hay que comprender mucho mejor los procesos fisiológicos que subyacen en el curso de la senescencia y condicionan la duración de la vida. Pero soy optimista respecto a dicho avance, pues se ha resuelto un misterio todavía más básico: por qué apareció el envejecimiento. Merced a tal respuesta, se ha elaborado una estrategia de investigación racional para descubrir las vías bioquímicas cuya manipulación nos podría traer años de vigor.

La selección natural adormecida

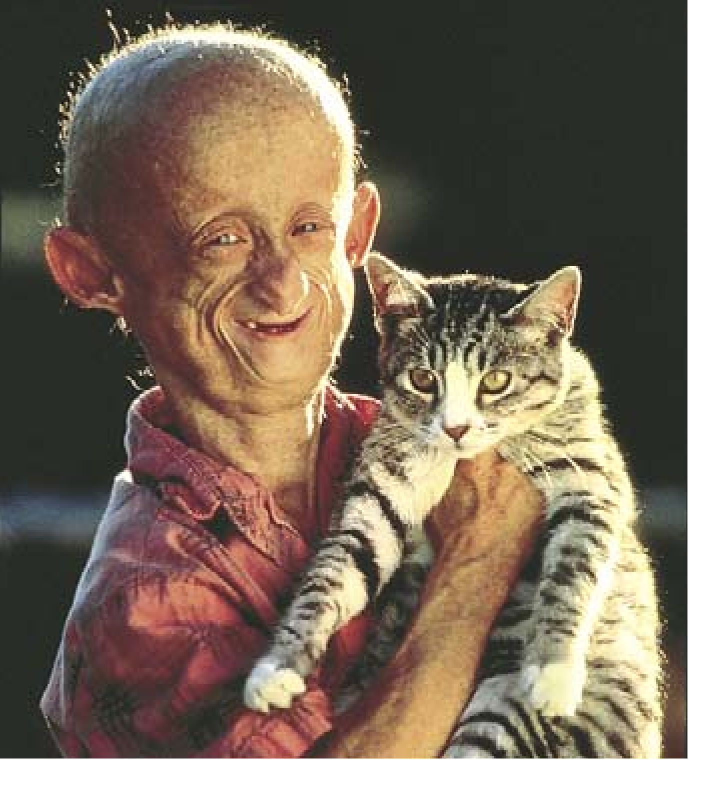
No existe un defecto general que afecte a todos los tipos de células y provoque el envejecimiento. Si hubiera un fallo así, y con tal universalidad, ningún animal escaparía al envejecimiento. Y algunos se libran. Hay anémonas de mar asexuales mantenidas en acuarios durante decenios que no muestran menoscabo de su salud. Tampoco se debe el envejecimiento a un programa genético diseñado por la naturaleza para evitar la superpoblación. Antes bien, la senescencia es subproducto de un modelo de selección natural que afecta a los humanos y a otros vertebrados, pero no a las anémonas marinas de multiplicación vegetativa. El envejecimiento aparece en las especies de reproducción sexual porque la intensidad de la selección natural disminuye cuando se llega a edad adulta.

Esta idea se deduce, en pura lógica, de la teoría general de la evolución. Los caracteres heredables persisten y se difunden en una población —se seleccionan—, si esas propiedades contribuyen a que sus portadores sobrevivan hasta la edad de reproducirse y produzcan descendencia. Cuanto más útiles sean esos caracteres, mayor será la descendencia y, por consiguiente, los genes que controlan dichas propiedades se perpetuarán. Al propio tiempo, se tornan más escasos los rasgos que reducen la supervivencia de los jóvenes —la selección actúa en su contra— porque sus portadores suelen morir antes de reproducirse.

A diferencia de lo que ocurre con los genes deletéreos, que actúan en fase muy precoz, cabría esperar que los genes que minan la vitalidad en los últimos años de la vida se acumularán en las poblaciones, pues los portadores los transmitirán a la siguiente generación antes de que sus efectos nocivos impidan la reproducción. (Cuanto más tarden en provocar incapacidad esos genes, más se propagarán, ya que sus portadores podrán reproducirse durante más tiempo.) Por tanto, el envejecimiento se introduce furtivamente en las poblaciones porque la selección natural, el cancerbero que protege los caracteres promotores del vigor juvenil, se va debilitando con la edad.

Fijémonos en una par de enfermedades genéticas, devastadoras, que ilustran la teoría: la progeria y la enfermedad de Huntington. La progeria, causada por una mutación aleatoria en la réplica de un gen durante el desarrollo embrionario, produce un envejecimiento espeluznante durante la infancia. Los sistemas vitales del niño degeneran con tal rapidez, que éste pronto parece tan anciano como sus abuelos. Los afectados por esta enfermedad suelen morir de cardiopatías o accidentes neurovasculares antes de cumplir los 15 años. La enfermedad de Huntington, que también está causada por un defecto en la réplica de un gen, se manifiesta en edad madura. En este caso, el sistema nervioso degenera y acaba por causar la muerte.

La progeria es un trastorno genético raro; bastante frecuente, la enfermedad de Huntington. ¿Por qué? Las personas con progeria mueren antes de dejar descendencia, de forma que la intensa selección natural elimina esta





3. El debilitamiento de la selección natural permite que se propaguen en una población los genes deletéreos que actúan en edades tardías. Nos lo muestran en toda su tragedia dos trastornos genéticos. La persona de la izquierda padecía progeria, causa de un rápido deterioro del organismo que se manifiesta en la infancia. Aunque parecía un anciano, en realidad era un niño. El hombre de la derecha sufría la enfermedad de Huntington, un trastorno neurodegenerativo que suele aparecer en edad madura. La progeria es rara porque la selección natural es intensa durante la infancia y suprime al gen causante: los afectados por la enfermedad no se reproducen; no transmiten, pues, el gen a la descendencia. La enfermedad de Huntington es más frecuente porque la selección natural se evidencia impotente contra ella; cuando las víctimas empiezan a mostrar síntomas, suelen haber legado el gen letal a la mitad de su descendencia.

mutación del acervo genético en cuanto aparece. En cambio, la mutación causante de la enfermedad de Huntington no entorpece la reproducción porque no provoca la discapacidad hasta que las personas han tenido todos o la mayoría de sus hijos. Es decir, se manifiesta en una etapa donde la intensidad de la selección natural es débil.

En los años cuarenta y cincuenta, J. B. S. Haldane y Peter B. Medawar introdujeron esta explicación evolutiva del envejecimiento, a la que W. D. Hamilton y Brian Charlesworth dotaron, en los años sesenta y setenta, de rigor matemático.

En lo que fue su resultado más importante, Hamilton y Charlesworth establecieron que, en los organismos que no se reproducen por partición, la fuerza de la selección natural sobre la supervivencia decae en la edad adulta para desaparecer del todo en la etapa postrera. Por ser fuente de toda adaptación —y, por tanto, de salud— la selección natural, conforme ésta desaparece la robustez de los organismos más viejos disminuye. Y con ausencia de selección natural en la edad provecta, la supervivencia corre tal peligro, que pronto no habrá condiciones ni cuidados médicos capaces de mantener la vida.

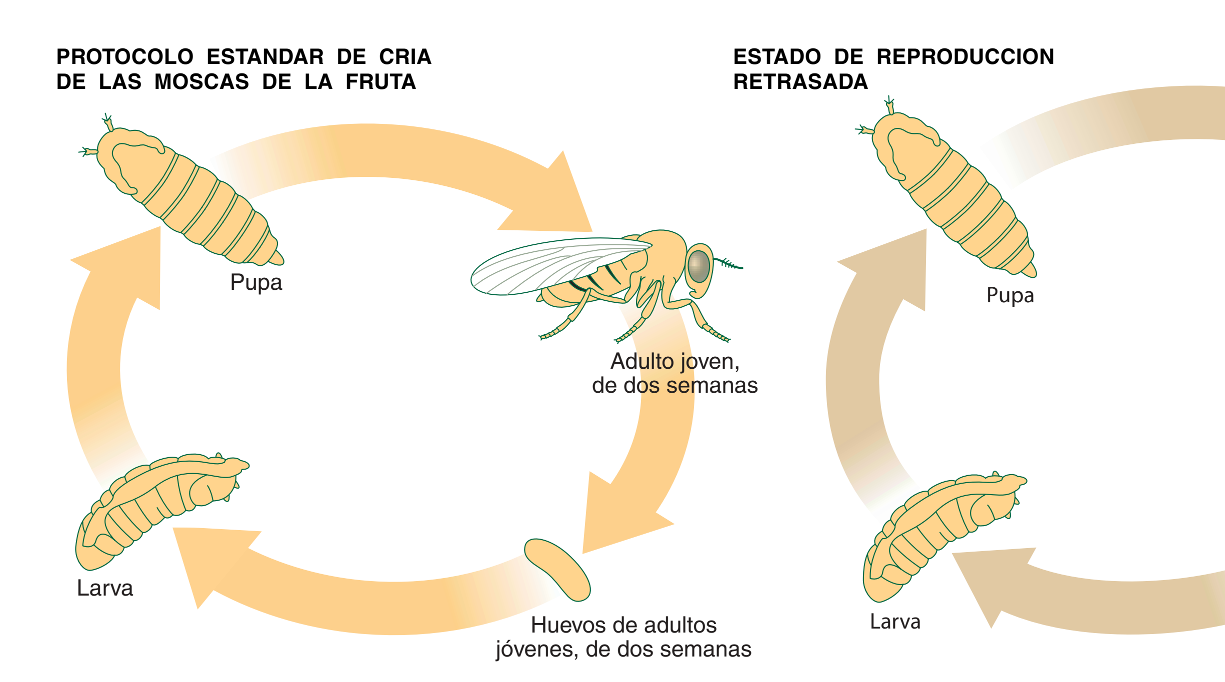
Desde los años setenta, se han confirmado en numerosas ocasiones y experimentos las pruebas matemáticas originales, la mayoría de las veces mediante manipulaciones que prolongan deliberadamente el período de selección natural intensa en animales de laboratorio. Los investigadores amplían este período retrasando la edad en que se inicia la reproducción; desechan los huevos fecundados por animales jóvenes y sólo utilizan los producidos a edades avanzadas. Por tanto, sólo los individuos con vigor suficiente para reproducirse a una edad tardía transmitirán sus genes a la siguiente generación.

Si la explicación de la evolución del envejecimiento descansara en la disminución de la intensidad de la selección natural tras el comienzo de la madurez, el aplazamiento progresivo de esa caída durante varias generaciones debería llevar a un retraso significativo en el envejecimiento dentro de la población experimental. Se ha corroborado esta predicción en experimentos con moscas de la fruta, que mostraron reproducción retrasada durante diez generaciones o más. Procedentes de esos experimentos disponemos de cepas que viven de dos a tres veces más de lo normal y se mantienen sanas un tiempo mayor.

Las moscas de envejecimiento retardado son sorprendentemente vivaces. No se limitan a mantener sus funciones biológicas en niveles normales durante períodos más prolongados, sino que exhiben capacidades superiores en edades adultas. Lo mismo en su juventud que en edad adulta, resisten mejor desecaciones agudas, inanición y otras tensiones por lo común letales. También muestran más destreza atlética que sus congéneres de la misma edad; andan y vuelan períodos más largos.

Si se pudiera tratar a las personas de la misma manera que a las moscas de la fruta, el problema de retrasar el envejecimiento humano podría resolverse demorando la procreación durante muchas generaciones. Pero hablaríamos de prácticas inhumanas, además de extremadamente lentas en conseguir resultados. Habrá, pues, que buscar otros métodos que en esencia imiten los cambios fisiológicos producidos por generaciones de reproducción postergada. (Es obvio que el retraso de la reproducción no produce beneficio en las primeras generaciones. Hasta la décima no se notaría cierto incremento en la longevidad y tendrían que pasar siglos en producir un incremento significativo.)

4. **Los experimentos realizados con moscas de la fruta respaldan la tesis que sostiene que el envejecimiento está causado por el debilitamiento de la selección natural en la madurez. Se permitía que un grupo control (*izquierda*) se reprodujera poco después de alcanzar la madurez, acortando así el período de selección natural intensa. Al mismo tiempo, se demoraba la reproducción en otro grupo (*derecha*), prolongando el período de selección natural intensa. Tras muchas generaciones, esta manipulación demoró el envejecimiento en machos y hembras del segundo grupo y aumentó su longevidad (*ver gráficos*).**



Las claves bioquímicas

La teoría evolutiva y algunos experimentos provisionales dan a entender que la longevidad está influida por centenares de vías bioquímicas —cadenas de interacciones moleculares— genéticamente determinadas, cuya manipulación podría retrasar el envejecimiento. Sin embargo, hasta ahora sólo se han descubierto unos cuantos de los genes implicados, sobre todo del nemátodo *Caenorhabditis elegans* y en la mosca de la fruta *Drosophila melanogaster*. Queda por determinar si los resultados obtenidos en estos organismos se aplican a los seres humanos.

También se han acometido algunos estudios en seres humanos. Los análisis genéticos realizados en centenarios franceses han permitido identificar variaciones de dos genes que podrían participar en el retraso del envejecimiento: uno cifra la apolipoproteína E (una proteína que interviene en el transporte de colesterol) y el otro, la enzima conversora de angiotensina (que interviene en la regulación de la presión arterial). En cada caso, se ha encontrado que determinados alelos (o variantes) de los genes son más comunes en los centenarios que en adultos jóvenes.

Con estos resultados no podemos indicar vías de terapia posibles contra el envejecimiento. Nadie sabe cómo podrían combatir el envejecimiento estos alelos comunes a las personas de vida prolongada. Además, aunque estos alelos o los descubiertos en nemátodos y moscas estuvieran ligados a una prolongación de las condiciones de salud, el descubrimiento



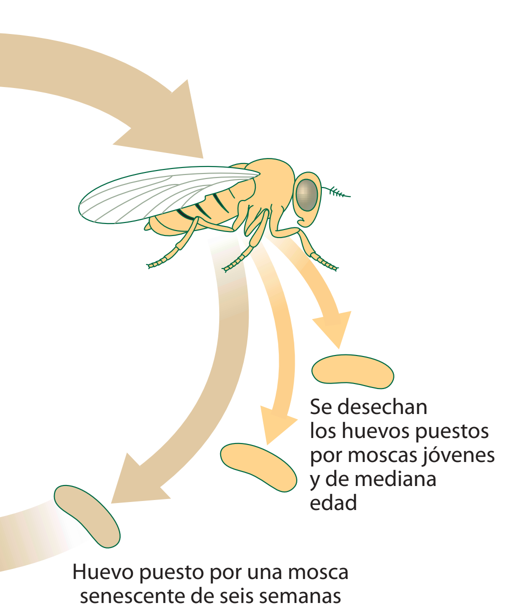
Los telómeros rematan los cromosomas. Aparecen resaltados con fluorescencia.

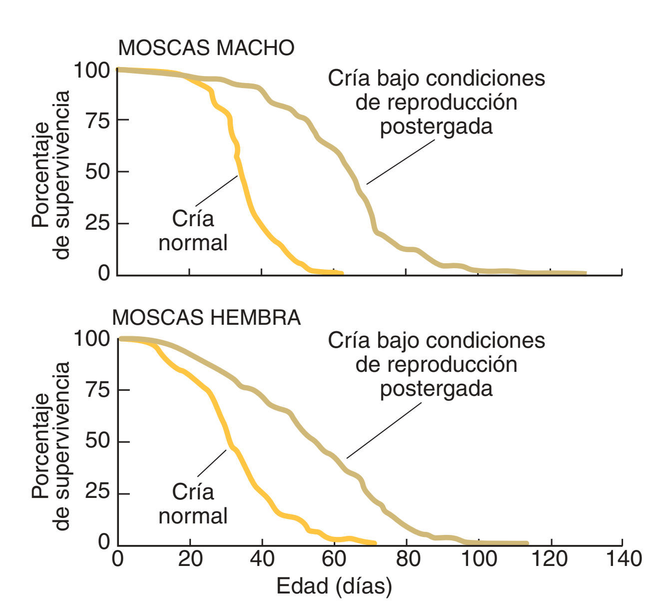
No hay remedios sencillos

Comparado con el resto de los organismos, *Homo sapiens* goza de una vida bastante larga. Pero nos gustaría vivir mucho más y con buena salud, deseo legítimo que puede cegarnos ante la realidad y creer en elixires inanes. Entre las terapias potenciales que se nos anuncian por doquier recordemos el ejercicio, la restricción alimentaria y la administración de hormonas del crecimiento, telomerasas y antioxidantes. El ejercicio mejora el funcionamiento durante el tiempo que se practica, pero no se ha demostrado que incremente la supervivencia a largo plazo. Además, sus beneficiosos efectos fisiológicos no persisten cuando se vuelve a una forma de vida más sedentaria. Inconveniente para la mayoría de las personas, no se ha investigado en humanos, de manera sistemática, la restricción alimentaria, eficaz sin embargo en roedores. Por fin, alterar a placer los niveles de cualquier hormona en el organismo siempre es arriesgado.

De un tiempo a esta parte se ha hablado mucho de la capacidad de la telomerasa para retrasar la senescencia de las células humanas en el tubo de ensayo. Esta enzima actúa sobre los telómeros, estructuras que rematan los extremos de los cromosomas. Los telómeros se acortan un poco en cada división celular; cuando la longitud cae por debajo de un umbral las células dejan de dividirse. Según algunos, las farmacoterapias encaminadas a preservar los telómeros permitirían que las células divididas se reprodujeran y conservaran su vigor de manera indefinida; también han propuesto que su conservación podría retrasar el envejecimiento del organismo. Pero no han podido demostrar su tesis en ningún individuo en concreto. Además, cualquier cosa que contribuya a la inmortalidad de las células corre el riesgo de provocar cáncer.

De los estudios acometidos en moscas de la fruta y otros organismos se infiere que los radicales libres (moléculas oxidantes, agresivas y sintetizadas por el propio organismo) intervienen en los procesos de envejecimiento. Hay en las moscas de la fruta un variante génico que determina una forma sumamente activa de la superoxidodismutasa —enzima carroñera de los destructivos radicales libres—; ese gen está asociado con una robusta longevidad. Si las reacciones de oxidación intervienen en el envejecimiento humano, el bloqueo de la producción de radicales libres o su eliminación podría contribuir a demorar el proceso de senescencia. Se ignora cómo conseguir esos efectos de manera segura en las personas. No se sabe si dichas intervenciones serían positivas.





seguiría siendo sólo un paso más hacia el retraso de la senescencia. La alteración del proceso multifactorial del envejecimiento va a necesitar, a buen seguro, la manipulación de varias vías bioquímicas, muchas quizá.

Para buscar alelos que podrían intervenir en el envejecimiento humano, un camino indicado sería comparar la constitución genética de animales normales con el genoma de los que presentan envejecimiento retardado. Para nuestra fortuna, el mismo enfoque que sirvió para someter a prueba la teoría evolucionista del envejecimiento nos vale ahora para sacar a la luz las secuencias génicas que influyen en la duración de la vida. Las moscas de la fruta cuya longevidad se prolongó mediante reproducción retardada muestran una mezcla de alelos diferente de la que aparece en congéneres normales. Los alelos en cuestión no se deben a un proceso selectivo previo y luego otorgados a las moscas de vida larga. Todo lo contrario. En respuesta al retraso en la reproducción, la selección natural construyó organismos que demoraban el envejecimiento.

La identificación de los alelos específicos que separan de los animales normales a los de vida prolongada facilitará la búsqueda de tratamientos que emulen o intensifiquen los efectos de los alelos beneficiosos y que contrarresten los efectos de los deletéreos.

La técnica determinará el ritmo

Los sujetos de los estudios comparativos pueden ser moscas de la fruta, roedores u otros animales, pero en todo caso el trabajo no será fácil. Habrá que identificar cientos o miles de alelos habituales de los sujetos de vida más larga y descifrar las funciones biológicas y las características de las proteínas correspondientes. Llámase "genómica funcional" la disciplina que se ocupa de ello. Tendrán que avanzar mucho los trabajos si queremos ver un aplazamiento significativo del envejecimiento humano en el año 2050.

Pese al derroche publicitario sobre potenciales efectos contra el envejecimiento de determinadas intervenciones, ninguna de las terapias propuestas se ha demostrado eficaz, ni es probable que alguna tenga un efecto notable por sí misma.

¿Qué vendrá tras el primer aplazamiento significativo del envejecimiento humano en un futuro más o menos mediato? Ulteriores aplazamientos. El retraso del envejecimiento humano no es un objetivo del todo o nada, como poner un hombre en la Luna. Nuestra supervivencia y actividad a edades avanzadas mejorará de manera acumulativa, de forma parecida a como han ido perfeccionándose los coches. No veo límite a la prolongación de la vida humana si descubrimos cómo activar los genes antienvejecimiento en los jóvenes o cómo preparar cócteles de fármacos con los mismos efectos que la ingeniería genética. Se ignoran las líneas fundamentales de tales intervenciones y si podremos acertar.

El aplazamiento del envejecimiento plantea cuestiones políticas y éticas. ¿Qué ocurrirá con la seguridad social en un futuro de envejecimiento retrasado? ¿Habrá más superpoblación? ¿Es inmoral que los ancianos se aferren a la vida? Estas cuestiones preocupan a muchas personas.

EL AUTOR



MICHAEL R. ROSE enseña biología evolutiva en la Universidad de California en Irvine. Su trabajo experimental con moscas de la fruta explora las teorías evolutivas del envejecimiento, la adaptación y los ciclos biológicos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EVOLUTIONARY BIOLOGY OF AGING. Michael R. Rose. Oxford University Press, 1991.

PROSPECTS FOR POSTPONING HUMAN AGING. Michael R. Rose y Theodore J. Nusbaum en *FASEB Journal*, vol. 8, n.º 12, páginas 925-928; septiembre 1994.

EVOLUTION OF HUMAN LIFESPAN: PAST, FUTURE, AND PRESENT. Michael R. Rose y Laurence D. Mueller en *American Journal of Human Biology*, vol. 10, n.º 4, páginas 409-420; 1998.

Creación cerebral de la mente

Durante mucho tiempo los filósofos, los neurólogos y la gente de la calle se han preguntado acerca de la naturaleza de la mente consciente. Una mejor comprensión de las funciones del cerebro debería conducirnos a una respuesta definitiva

Antonio R. Damasio

En las puertas del nuevo milenio, una pregunta de las ciencias de la vida destaca sobre todas las demás: ¿de qué modo emerge de la actividad cerebral el conjunto de procesos que llamamos mente? Lejos de ser nueva, esta pregunta se ha formulado de una manera u otra a lo largo de los siglos. En realidad, se ha planteado abierta e insistentemente desde el momento en que alguien pudo hacerlo sin ser por ello quemado en una pira. La cuestión preocupa no sólo a los expertos (neurólogos, psicólogos y filósofos), sino también a cuantos se han interrogado sobre el origen de la mente, en particular de la mente consciente.

La cuestión de la consciencia ocupa ahora el centro del escenario porque la biología en general y la neurología en particular han experimentado un considerable desarrollo y han revelado una gran cantidad de secretos de la vida. Se ha aprendido más sobre el cerebro y la mente en la década de los noventa, la llamada década del cerebro, que durante toda la historia precedente de la psicología y la neurología. Elucidar las bases neurobiológicas de la mente consciente, una versión del problema clásico cuerpo-mente, se ha convertido en casi un desafío obligado.

La contemplación de la mente puede infundir temor en quien la contempla, especialmente cuando la consciencia es el principal foco de interés. Algunos, expertos o aficionados, creen que la cuestión podría carecer, por principio, de respuesta. Para otros, el incremento implacable y exponencial de nuevos conocimientos es capaz de originar el vertiginoso sentimiento de que ningún problema puede resistir el asalto de la ciencia si se dispone de una teoría correcta y técnicas capaces. Nos hallamos ante un debate excitante, inesperado incluso, pues no han surgido dudas similares sobre la probabilidad de explicar la responsabilidad del cerebro en la visión o la memoria, que son obvios componentes del más amplio proceso de la mente consciente.

Estoy firmemente convencido de que algún día, quizá pronto, daremos con una explicación coherente de la emergencia de la mente a partir del cerebro. Sin embargo, ese sentimiento vehemente queda atemperado por el reconocimiento de algunas dificultades no menores.

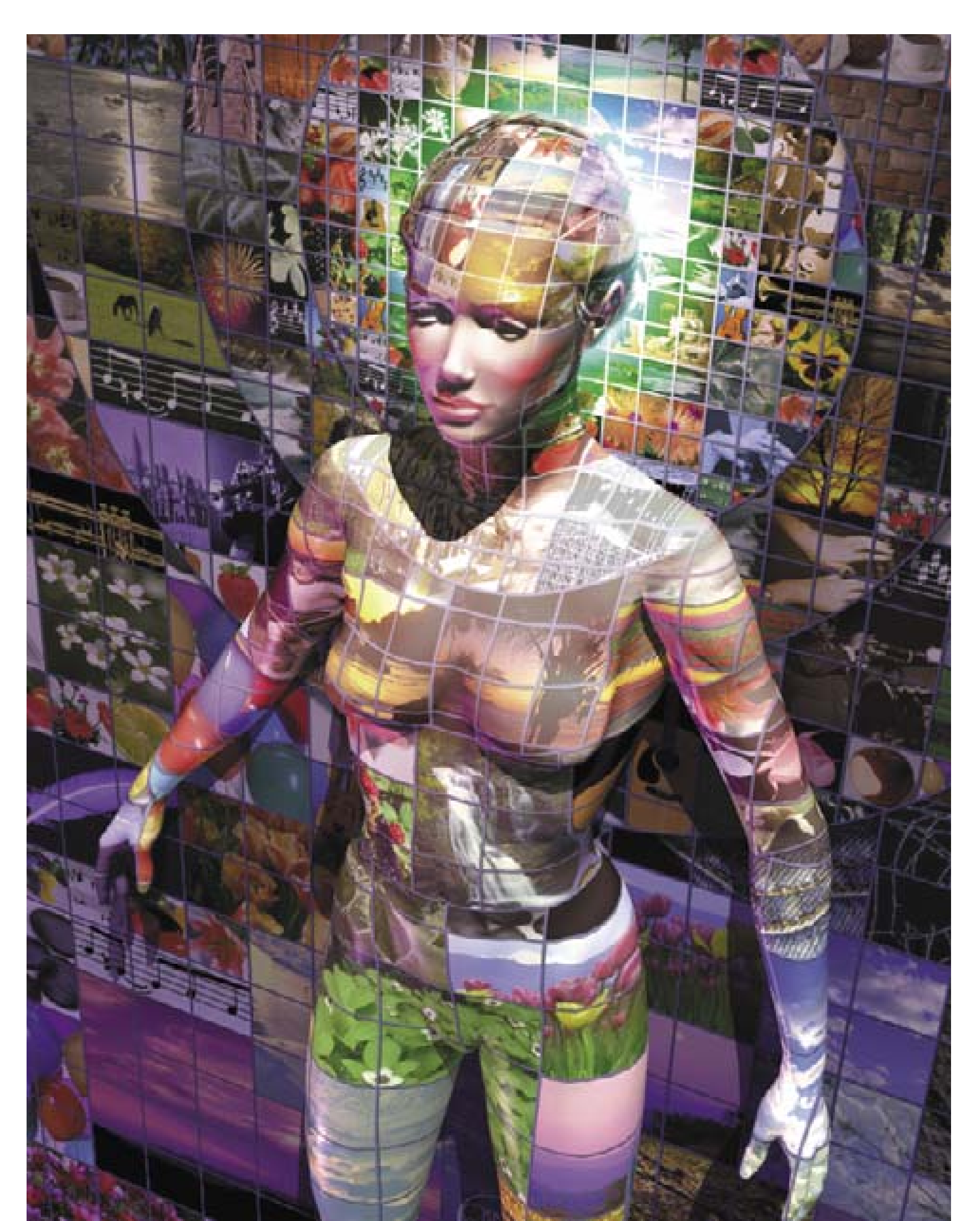
Nada más familiar que la mente. Y, pese a ello, hasta el peregrino que busca sus fuentes y mecanismos subyacentes se embarca en un viaje por un país extraño y exótico. Sin un orden particular, lo que sigue a continuación son los principales problemas a los que se enfrentan quienes buscan las bases biológicas de la mente consciente.

El primer dilema tiene que ver con la perspectiva que debe adoptarse para estudiar la mente en relación con el cerebro, donde, eso opino, halla su origen. El cuerpo y el cerebro de cualquiera de nosotros son observables por terceros; sin embargo, la mente sólo es accesible a su propietario. Diferentes individuos pueden hacer las mismas observaciones acerca de un determinado cuerpo o cerebro, pero no es posible una observación directa similar con respecto a la mente de nadie. El cuerpo y su cerebro son entidades públicas, mostrables, externas e inequívocamente objetivas. La mente es una entidad privada, escondida, interna e inequívocamente subjetiva.

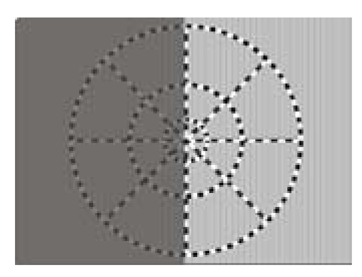
Así las cosas, ¿cómo podemos vincular la mente de un sujeto al cuerpo objetivable para un tercero? Entre las técnicas aplicadas al estudio del cerebro se citan el barrido del encéfalo con la formación consiguiente de imágenes y el registro de los patrones de actividad de las neuronas. Quienes se oponen a la emergencia objetan que la compilación exhaustiva de todos esos datos aporta sólo *correlatos* de los estados mentales, sin añadir nada que se parezca a un *verdadero estado mental*. Para ellos, la observación detallada de la materia viva no nos lleva a la mente, sino tan sólo a la materia viva detallada. La comprensión de cómo ésta genera el sentido del yo o de identidad, distintivo de la mente consciente, es lisa y llanamente imposible. Este argumento, aunque incorrecto, tiende a silenciar a muchos esperanzados investigadores de la mente consciente.

Para los pesimistas, el problema resulta tan inabordable, que niegan incluso la posibilidad de explicar por qué la mente trata *sobre* algo, es decir, por qué los procesos mentales representan estados internos o interacciones con objetos externos. (Los filósofos se refieren a esta propiedad figurativa de la mente con el confuso término de "intencionalidad.") Este argumento es falso.

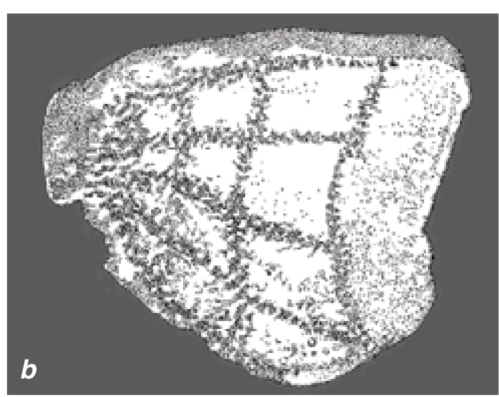
La propuesta negativa final consiste en recordarnos que elucidar la emergencia de la mente consciente es algo que depende de la existencia



1. El espectáculo multimedia de la mente se desarrolla sin pausa a medida que el cerebro procesa los estímulos sensoriales externos e internos. El sentido del yo emerge cuando el cerebro responde a la pregunta no formulada de quién está experimentando ese espectáculo.







2. Compete al cerebro representar cosas ajenas a él mismo. Los estudios en macacos muestran una extraordinaria fidelidad entre la forma observada (*a*) y el patrón de actividad nerviosa (*b*) en una de las capas de la corteza visual primaria.

de esa misma mente consciente. Conducir una investigación con el mismísimo instrumento que se está investigando determina que la definición del problema y la búsqueda de una solución del mismo revistan especial complicación. Dado el conflicto entre observador y observado, se nos dice, el intelecto humano difícilmente logrará acometer la tarea de comprender de qué modo la mente emerge del cerebro. Admitiendo la realidad del conflicto, pensamos que la idea de que es insuperable resulta inexacta.

En definitiva, la manifiesta singularidad del problema de la mente consciente y las dificultades con que tropieza el camino para solucionarlo generan dos efectos. Por un lado, frustran a los investigadores que pretenden encontrar una solución y, por otro, refuerzan la convicción de quienes intuitivamente creen que la solución se halla fuera de nuestro alcance.

Examen de las dificultades

Los autores que se refugian en la incapacidad de la investigación sobre la materia viva del cerebro para revelar la "sustancia de la mente" dan por supuesto que el conocimiento actual acerca de la materia viva permite establecer un juicio definitivo. Sin embargo, este planteamiento es a todas luces inaceptable. Es cierto que el conocimiento que actualmente tenemos de los fenómenos nerviosos es bastante incompleto, se mire como se mire. Todavía no hemos resuelto numerosos detalles que conciernen a la función molecular de neuronas y circuitos; ni hemos logrado entender el comportamiento de las poblaciones de neuronas en el marco de una región particular del cerebro; y aún tenemos una pobre comprensión de los sistemas de gran escala, es decir, los que incluyen múltiples regiones del cerebro. Estamos empezando a esbozar el hecho de que las interacciones entre regiones discontinuas del cerebro originen probablemente estados biológicos muy complejos que lo son muchísimo más que la suma de sus partes.

Ahora bien, la propia explicación física de los fenómenos biológicos es todavía incompleta. Por eso mismo, afirmar que el problema de la mente consciente es insoluble porque hemos estudiado el cerebro y no hemos encontrado la mente resulta indecente. No hemos estudiado con detenimiento ni la biología del sistema nervioso ni la física a ella vinculada. Piénsese que en el nivel más sutil de descripción de la mente, algo como la construcción, la manipulación y la superposición instantáneas de diferentes imágenes sensoriales, podría requerir una explicación cuántica. Por cierto, al asumir la noción de un posible papel de la física cuántica en la elucidación de la mente, una idea que suele asociarse a Roger Penrose, de la Universidad de Oxford, no pretendo respaldar las propuestas específicas de este físico matemático, en particular la que postula que la consciencia está basada en fenómenos de nivel cuántico que se desarrollan en los microtúbulos, unos elementos estructurales de las neuronas y otras células. Lo que estoy proponiendo es que la consideración cuántica de las actividades podría ayudar a explicar de qué modo tenemos una mente, pero la reputo innecesaria para explicar cómo *sabemos* que poseemos una mente, la cuestión crítica, en mi opinión, para una explicación general de la consciencia.

La peculiar rareza del problema de la mente consciente refleja, sobre todo, ignorancia, lo que limita la imaginación acerca del mismo y da lugar al curioso efecto de hacer que lo posible parezca imposible. Arthur C. Clarke, autor de varias obras sobre fantasía científica, ha escrito que "cualquier técnica suficientemente avanzada es indistinguible de la magia". La "técnica" del cerebro es tan compleja, que parece "mágica" o, por lo menos, impenetrable. La apariencia de un abismo entre los estados mentales y los fenómenos físico-biológicos deriva de la gran disparidad entre los dos cuerpos de conocimiento, el de la buena comprensión de la mente que hemos logrado a lo largo de siglos de introspección y por los esfuerzos de la ciencia cognitiva y el de la incompleta especificación nerviosa que tenemos a través de los empeños de la neurología. Pero no hay razón alguna para

suponer que la neurología no pueda rellenar ese abismo. Nada indica que hayamos llegado al borde de un abismo que separase, en principio, lo mental de lo nervioso.

Por tanto, sostengo que los procesos biológicos que ahora presumimos se corresponden con procesos mentales *son* procesos mentales y así serán contemplados el día en que los conozcamos con suficiente detalle. No estoy negando la existencia de la mente, ni afirmando que, una vez sepamos lo que necesitamos saber sobre la biología de la mente, ésta dejará de existir. Simplemente creo que la mente, privada y personal, preciosa y única, *es* de naturaleza biológica y que llegará el momento en que podamos describirla mediante expresiones biológicas y mentales.

Aduce la otra objeción principal contra la comprensión de la mente que el conflicto real entre observador y observado hace inadecuado al intelecto humano para estudiarse a sí mismo. Importa señalar, sin embargo, que el cerebro y la mente no son monolíticos, pues poseen niveles estructurales múltiples y los más altos de ellos crean instrumentos que permiten la observación de los niveles inferiores. Por ejemplo, el lenguaje dotó a la mente del poder de jerarquizar y manipular los conocimientos según principios lógicos, y ello nos ayuda a clasificar las observaciones entre verdaderas y falsas. Deberíamos ser modestos con respecto a la posibilidad de llegar a observar algún día nuestra naturaleza entera. Pero declarándonos derrotados antes incluso de haberlo intentado desafía la apreciación de Aristóteles según la cual los seres humanos son infinitamente curiosos sobre su propia naturaleza.

Razones para el optimismo

Mi propuesta de solución para el enigma de la mente consciente requiere dividir el problema en dos partes. La primera se refiere a la generación de "una película-en-el-cerebro". Me sirve esa metáfora para designar la composición integrada y unificada de diversas imágenes sensoriales (visual, auditiva, táctil y otras) que constituyen el espectáculo multimedia que llamamos mente. La segunda parte concierne al "yo" y a la generación automática de un sentido de propiedad de esa "película-en-el-cerebro". Ambas partes del problema se hallan relacionadas, pues la segunda anida en la primera. El separarlas constituye una estrategia útil de investigación, ya que cada una demanda su propia solución.

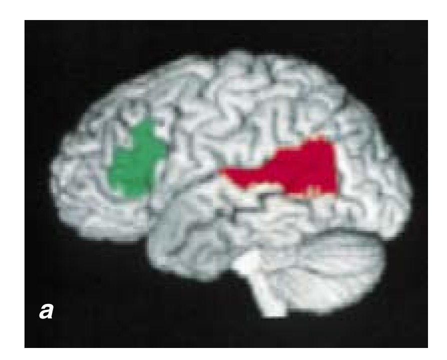
A lo largo de la historia de la disciplina, los neurólogos, sin pretenderlo, se han dedicado, en buena medida, a la resolución del problema de la mente consciente en lo que tiene de película-en-el-cerebro. La cartografía de las regiones cerebrales que intervenían en la construcción de esa película empezó hace ya casi un siglo y medio, cuando Paul Broca y Carl Wernicke hablaron de la implicación de distintas zonas del cerebro en el procesamiento de aspectos del lenguaje diferentes. Andando el tiempo, merced al desarrollo de herramientas cada vez más refinadas, ese esfuerzo ha comenzado a cosechar resultados generosos.

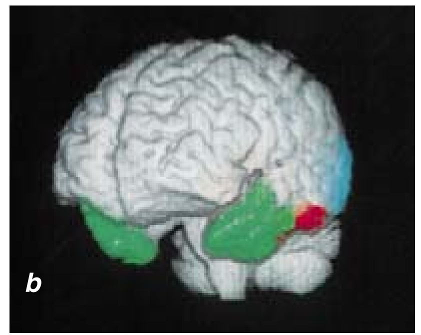
Podemos ahora registrar directamente la actividad de una neurona o de un grupo de ellas y vincular esa actividad con aspectos particulares de un estado mental específico, como la percepción del color rojo o de una línea curva. Las técnicas de obtención de imágenes del cerebro —recordemos la TEP (tomografía de emisión de positrones) o la RMF (resonancia magnética funcional)— revelan el modo en que diferentes regiones del cerebro de una persona viva y sana están comprometidas en un determinado estado mental; por ejemplo, la relación de una palabra con un objeto o el reconocimiento de un rostro. Podemos determinar también la participación de las moléculas de los microscópicos circuitos nerviosos en dicha diversidad de tareas mentales; y podemos identificar, asimismo, los genes responsables de la producción y despliegue de dichas moléculas.

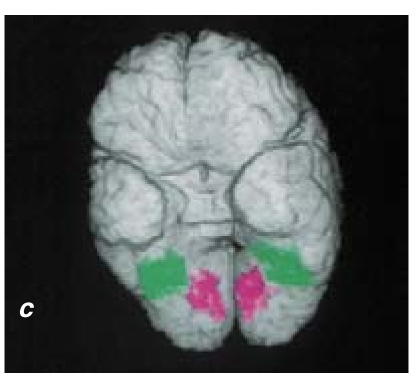
En ese campo se ha progresado a paso firme desde que David H. Hubel y Torsten Wiesel, de la Universidad de Harvard, proporcionaron el primer indicio de representación cerebral de la forma de un objeto dado: demostraron que las neuronas de la corteza visual primaria estaban selectivamente sintonizadas para responder a bordes orientados en ángulos diversos. Hubel y Margaret S. Livingstone, también de Harvard, mostraron más tarde que otras neuronas de la corteza visual primaria respondían selectivamente al color, pero no a la forma. Y Semir Zeki, del Colegio Universitario de Londres, observó que las regiones del cerebro que recibían información procedente de la corteza visual primaria estaban especializadas en el procesamiento subsecuente del color y el movimiento. Estos resultados son complementarios de observaciones realizadas en pacientes neurológicos en los que se ha podido comprobar que las lesiones inferidas en diferentes regiones de la corteza visual impiden la percepción del color, sin afectar en absoluto al discernimiento de la forma y el movimiento.

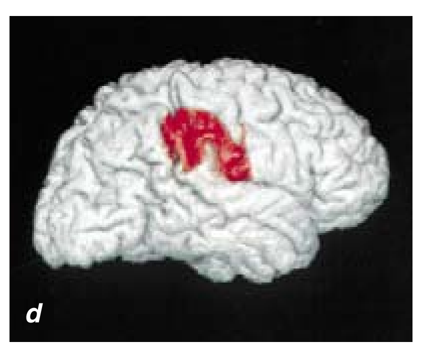
De hecho, numerosos trabajos ponen ahora de manifiesto la existencia de una correspondencia entre la estructura de un objeto tal como es captado por el ojo y el patrón de actividad nerviosa generado en la corteza visual del organismo que mira ese objeto.

Un progreso todavía mayor en varios aspectos de la película-en-el-cerebro nos ha permitido mejorar nuestro conocimiento acerca

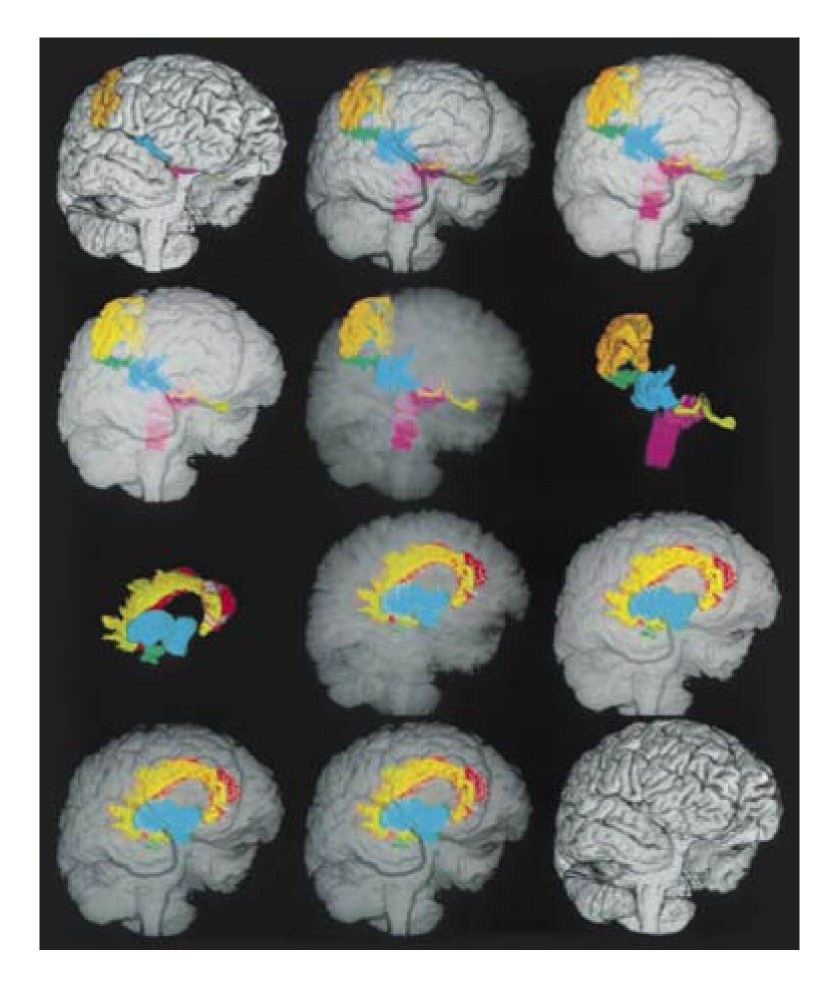








3. La neurología continúa asociando estructuras cerebrales específicas con determinadas tareas. Las fotografías *a* y *b* muestran resaltadas algunas regiones del lenguaje. La fotografía *c* muestra la región que procesa el color (*en rojo*) y las imágenes de rostros (*en verde*). La percepción del propio cuerpo depende de la región mostrada en *d*.



4. El sentido del yo se asienta en las regiones profundas del encéfalo. Mediante secciones de la anatomía externa del cerebro se nos revelan algunas de las estructuras interiores responsables de la regulación homeostática, las emociones, el estado de vigilia y el sentido del yo.

de los mecanismos del aprendizaje y la memoria. En rápida sucesión, la investigación ha revelado que el cerebro usa sistemas discretos para diferentes tipos de aprendizaje. Resulta decisiva la intervención de ganglios basales y cerebelo para aprender a montar en bicicleta, tocar un instrumento musical o la adquisición de otras habilidades. Para el aprendizaje de hechos pertenecientes a entidades como gentes, lugares o eventos se requiere la participación del hipocampo. Una vez aprendidos estos hechos, su memoria a largo plazo se apoya en sistemas cerebrales multicomponentes, cuyas partes críticas se alojan en la amplia expansión cerebral que llamamos corteza.

Además, el proceso en cuya virtud los hechos recientemente aprendidos se consolidan en la memoria a largo plazo trasciende la actuación del hipocampo y la corteza cerebral. A escala celular y molecular, determinados procesos deben ejecutarse de suerte tal, que los circuitos nerviosos queden, por así decirlo, grabados con las impresiones dejadas por un hecho recientemente aprendido. Este grabado depende de la potenciación o debilitación de las sinapsis, contactos entre las neuronas. Eric R. Kandel, de la Universidad de Columbia, y Timothy P. Tully, del laboratorio Cold Spring Harbor, acaban de descubrir que semejante fijación de la impresión exige la síntesis de nuevas proteínas, fabricación que se basa, a su vez, en la activación de genes específicos contenidos en las neuronas responsables de la consolidación de la memoria.

Estos breves retazos del progreso logrado podrían ampliarse con otros hallazgos procedentes de los estudios del lenguaje, la emoción y la toma de decisiones. Ante cualquier función mental que consideremos, podemos identificar diferentes partes del cerebro que contribuyen a la producción de esa función trabajando de un modo concertado; existe una estrecha correspondencia entre la aparición de un estado mental o conductual y la actividad de regiones específicas del cerebro. Esta correspondencia puede establecerse entre una región macroscópicamente identificable (por ejemplo, la corteza visual primaria, un área asociada al lenguaje o un núcleo relacionado con la emoción) y los circuitos nerviosos microscópicos que constituyen esa región.

Con todo, lo más importante estriba en que estos impresionantes avances del estudio del cerebro son sólo el principio. Las nuevas técnicas analíticas mejoran sin pausa nuestra capacidad para abordar las funciones nerviosas en el ámbito molecular e investigar los fenómenos de gran escala y complejos que emanan del cerebro en su integridad. Los resultados que se cosechen en ambos enfoques posibilitarán el establecimiento de correspondencias más sutiles entre estados cerebrales y estados mentales, entre cerebro y mente. Conforme se depura la técnica y crece la acuidad de los expertos van entrando en el foco de atención, con mayor nitidez, las estructuras físicas y las actividades biológicas que constituyen la película-en-el-cerebro.

El estudio del yo

La situación actual de la investigación en neurología de la cognición y la acumulación de hechos consistentes podrían bastar para que muchos incrédulos se convencieran de la posibilidad de identificar las bases nerviosas de la película-en-el-cerebro. Pero aun así, a los escépticos les costará aceptar que la segunda parte del problema de la mente consciente, es decir, la emergencia de un sentido del yo, pueda solucionarse en lo más mínimo. Aunque concedo que la solución de esta parte del problema no es obvia, existe una propuesta plausible y una hipótesis que se está sometiendo a prueba.

Esta hipótesis se basa en la capacidad exclusiva de representación que caracteriza al cerebro. Las células del riñón o del hígado llevan a cabo su función y no representan a ninguna otra célula o función. Pero las células cerebrales, de cualquier nivel del sistema nervioso, representan entidades o acontecimientos que puedan darse en cualquier parte del organismo. Las células del cerebro se han diseñado para operar *sobre* otras cosas y otros quehaceres. Nacieron para ser cartógrafos de la geografía de un organismo y de los sucesos que acontecen en esa geografía.

El misterio de la mente “intencional”, relativa a la representación de objetos externos, deja de ser tal. La desesperanza filosófica que rodea al obstáculo de la “intencionalidad” antes aludido (por qué los estados mentales representan emociones internas o interacciones con los objetos externos) crece si consideramos al cerebro en un contexto darwinista: la evolución ha pergeñado un cerebro cuya tarea consiste en representar directamente al organismo e indirectamente a todo aquello con lo que ese organismo interactúa.

La intencionalidad natural del cerebro nos conduce entonces hasta otro hecho establecido, a saber, que este órgano entraña en su estructura mecanismos diseñados para controlar la vida del cuerpo en el sentido de mantener, en todo momento, constantes los equilibrios químicos internos indispensables para la supervivencia. Mecanismos que no son hipotéticos ni abstractos; residen en el tallo cerebral y en el hipotálamo. Y esos reguladores de la vida representan también, necesariamente, a los estados en permanente cambio del organismo a medida que van teniendo lugar. En otras palabras, el cerebro dispone de un medio natural para representar la estructura y el estado del *conjunto* del organismo.

Pero, ¿cómo pasar del yo biológico al sentido de propiedad de nuestros pensamientos, es decir, a la sensación de que nuestros pensamientos se construyen en nuestra propia perspectiva, sin caer en la trampa de invocar al famoso homúnculo que interpreta la realidad de uno mismo? ¿Cómo conocer el yo y lo que le circunda? Para mí, el fundamento biológico del sentido del yo se halla en los mecanismos cerebrales que representan, instante a instante, la continuidad del mismo organismo.

Por decirlo de un modo sencillo, mi hipótesis sugiere que el cerebro utiliza sus estructuras de representación del organismo y de los objetos externos para crear una nueva representación de segundo orden. Esta representación indica que el organismo, cartografiado en el cerebro, está implicado en la interacción con un objeto, cartografiado también en el cerebro. Tal representación de segundo orden no constituye abstracción alguna; antes bien acontece en estructuras nerviosas, a saber, el tálamo y la corteza cingulada.

El conocimiento, así acuñado, añade importante información al proceso mental en curso. En concreto, *presenta* dentro del proceso mental la información de que el organismo es el propietario de ese proceso. Aporta una respuesta a la pregunta nunca planteada: ¿a quién le está pasando esto? Se crea, pues, la sensación de un yo en el acto de conocer, lo que constituye la base para la perspectiva de primera persona que caracteriza a la mente consciente.

De nuevo, y desde una aproximación evolutiva, se torna claro el imperativo de un sentido del yo. Imaginemos el contraste entre un organismo autoconsciente y otro semejante que no lo sea. El primero dispone de un incentivo para atender a las señales de alarma dadas por la película-en-el-cerebro (por ejemplo, el dolor causado por un estímulo particular) y evitar consecuentemente en adelante ese estímulo. La evolución del yo prima a la consciencia, pues ésta constituye una clara ventaja para la supervivencia.

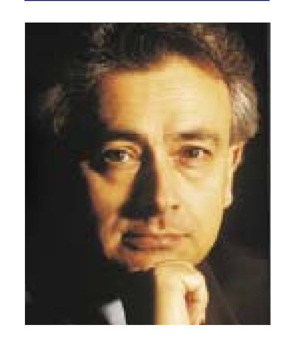
Teniendo en cuenta la metáfora de la película, mi solución al problema de la mente consciente consiste en que el sentido del yo en el acto de conocer emerge *en el interior* de la propia película. Es decir, la autoconsciencia forma, en realidad, parte de esa película ya que crea, en un mismo marco, “lo observado” y “el observador”, “lo pensado” y “el pensador”. No hay un espectador externo. La idea de espectador se construye dentro de la película y no hay ningún homúnculo fantasma rondando la sala de proyección. Los procesos objetivos del cerebro tejen la subjetividad de la mente consciente al margen del tejido del mapa sensorial. Y puesto que el principal mapa sensorial pertenece a los estados del cuerpo y se figura en forma de sentimientos, el sentido del yo en el acto de conocer emerge como un tipo especial de sentimiento, el sentimiento de lo que pasa en un organismo aprehendido en el acto de interactuar con un objeto.

El futuro

Sería absurdo predecir qué se va o no se va a descubrir. Sin embargo, creo que podemos arriesgarnos a decir que para el año 2050 tendremos suficiente conocimiento de los fenómenos biológicos para suprimir el dualismo tradicional entre cuerpo y cerebro, cuerpo y mente, cerebro y mente.

Algunos podrían temer que, con la determinación de la estructura física de algo tan valioso y digno como la mente humana, ésta quede degradada, si no desechada. Pero explicar los orígenes y operaciones de la mente en el tejido biológico no comportará su eliminación; el mismo respeto que por ella sentimos puede hacerse extensible a la asombrosa microestructura del organismo y a las funciones extraordinariamente complejas que la generan. Cuando comprendamos la mente en un nivel más profundo, la veremos como el más complejo de los fenómenos biológicos de la naturaleza y no como un misterio de naturaleza desconocida.

EL AUTOR



ANTONIO R. DAMASIO ocupa la cátedra M. W. Van Allen de la facultad de medicina de la Universidad de Iowa, cuyo departamento de neurología dirige. Es también profesor adjunto del Instituto Salk de Estudios Biológicos en San Diego. Nació en Portugal y se licenció y doctoró en Medicina en la Universidad de Lisboa. Junto a su esposa Hanna, Damasio ha creado en Iowa una clínica de investigación de trastornos nerviosos de la mente y el comportamiento.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE REDISCOVERY OF THE MIND. John R. Searle. MIT Press, 1992.

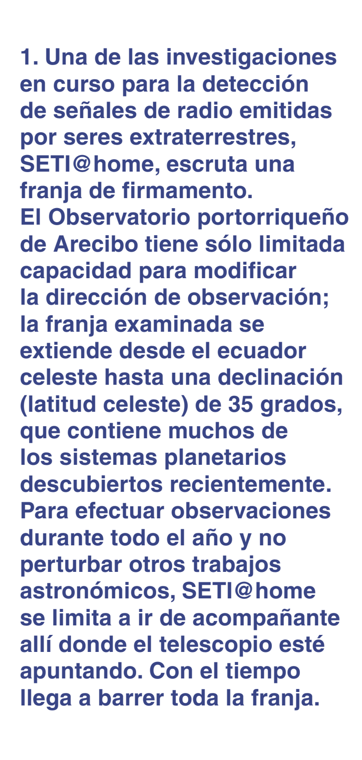
THE ENGINE OF REASON, THE SEAT OF THE SOUL: A PHILOSOPHICAL JOURNEY INTO THE BRAIN. Paul M. Churchland. MIT Press, 1995.

THE FEELING OF WHAT HAPPENS: BODY AND EMOTION IN THE MAKING OF CONSCIOUSNESS. Antonio R. Damasio. Harcourt Brace, 1999.

¿Existe vida en otro lugar del universo?

Nadie lo sabe. Hasta ahora la búsqueda de vida extraterrestre no ha sido tan exhaustiva como pudiera creerse, pero la situación va a cambiar

Jill C. Tarter y Christopher F. Chyba

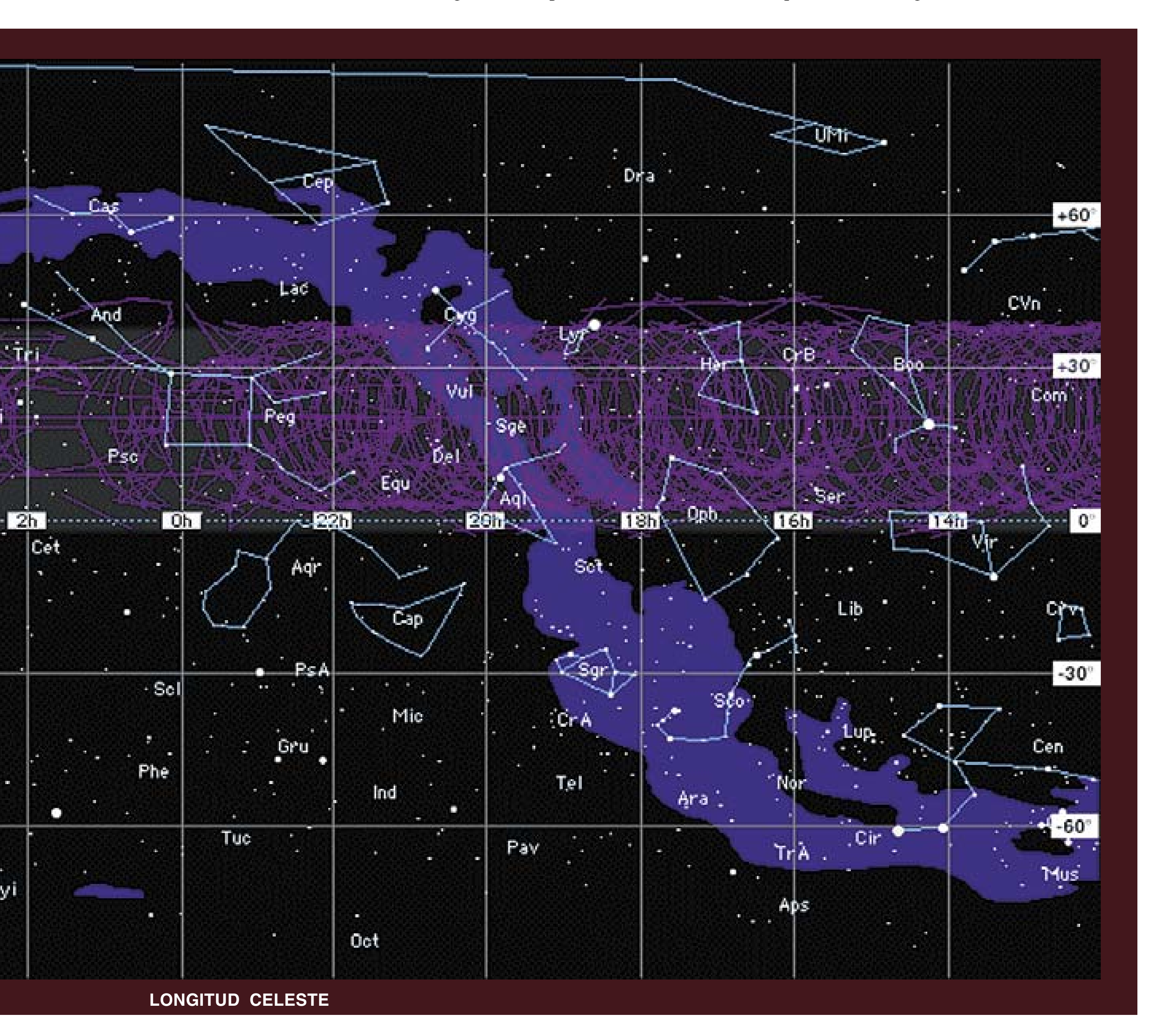


1. Una de las investigaciones en curso para la detección de señales de radio emitidas por seres extraterrestres, SETI@home, escruta una franja de firmamento. El Observatorio portorriqueño de Arecibo tiene sólo limitada capacidad para modificar la dirección de observación; la franja examinada se extiende desde el ecuador celeste hasta una declinación (latitud celeste) de 35 grados, que contiene muchos de los sistemas planetarios descubiertos recientemente. Para efectuar observaciones durante todo el año y no perturbar otros trabajos astronómicos, SETI@home se limita a ir de acompañante allí donde el telescopio esté apuntando. Con el tiempo llega a barrer toda la franja.

Durante 40 años se han venido examinando señales de radio, por si pudieran proceder de algún aparato o artefacto extraterrestre. Menos a uno, se han enviado naves espaciales a todos los planetas del sistema solar. Conocemos bastante mejor las condiciones en que pueden medrar los seres vivos. Y existe la idea extendida de que se ha llevado a cabo por doquier una minuciosa búsqueda de indicios de vida. Nada más lejos de la verdad; la investigación apenas si ha dado comienzo.

Suponiendo que nuestro programa espacial actual tenga continuidad, hacia el año 2050 se podría por fin saber si hay, o hubo, vida en algún otro lugar del sistema solar. Habremos, cuando menos, explorado concienzudamente los candidatos verosímiles, lo que no cabe afirmar hoy. Sabremos si late vida en Europa, uno de los satélites de Júpiter, o en Marte. Y habremos emprendido un examen exobiológico exhaustivo de sistemas planetarios de otras estrellas, buscando indicios de vida en los espectros de atmósferas planetarias. A tales exploraciones se sumarán otras búsquedas de signos de inteligencia mucho más amplias que las actuales.

Tal vez se descubra que la vida constituye un fenómeno común, mientras que la inteligencia técnica es muy rara; o, quizá, que una y otra son fenómenos corrientes o fenómenos excepcionales. Por ahora lo ignoramos. Apenas si hemos hurgado en las profundidades de la Vía Láctea, una galaxia imponente. De hecho, la exploración de nuestro sistema solar es tan somera, que no cabe descartar siquiera posibilidades exóticas, como la existencia de pequeñas sondas robóticas enviadas aquí hace mucho tiempo con el propósito de esperar la aparición de una especie capaz de elaborar una técnica. Tal vez, a lo largo de los próximos 50 años, la búsqueda de inteligencia



extraterrestre tenga éxito, si es que la situación no es la de 1959, cuando Giuseppe Cocconi y Philip Morrison se vieron forzados a declarar que "la probabilidad de éxito es difícil de estimar, pero si la investigación nunca se realiza, la posibilidad de éxito es nula".

Para proceder a la búsqueda de vida, hágase donde se hiciere, hemos de tener una idea clara de qué aceptar por vida. Muchos han adoptado una definición "darwinista", según la cual la vida es un sistema químico automantenido y capaz de experimentar evolución por selección natural. Si se admite esa definición, se habrán producido en el laboratorio sistemas moleculares vivos mucho antes del 2050. No está claro en qué medida estos sistemas proporcionarán información sobre la historia primitiva de la vida, en la Tierra o fuera de ella, pero sí darán, al menos, ejemplos de la diversidad de estilos biológicos plausibles.

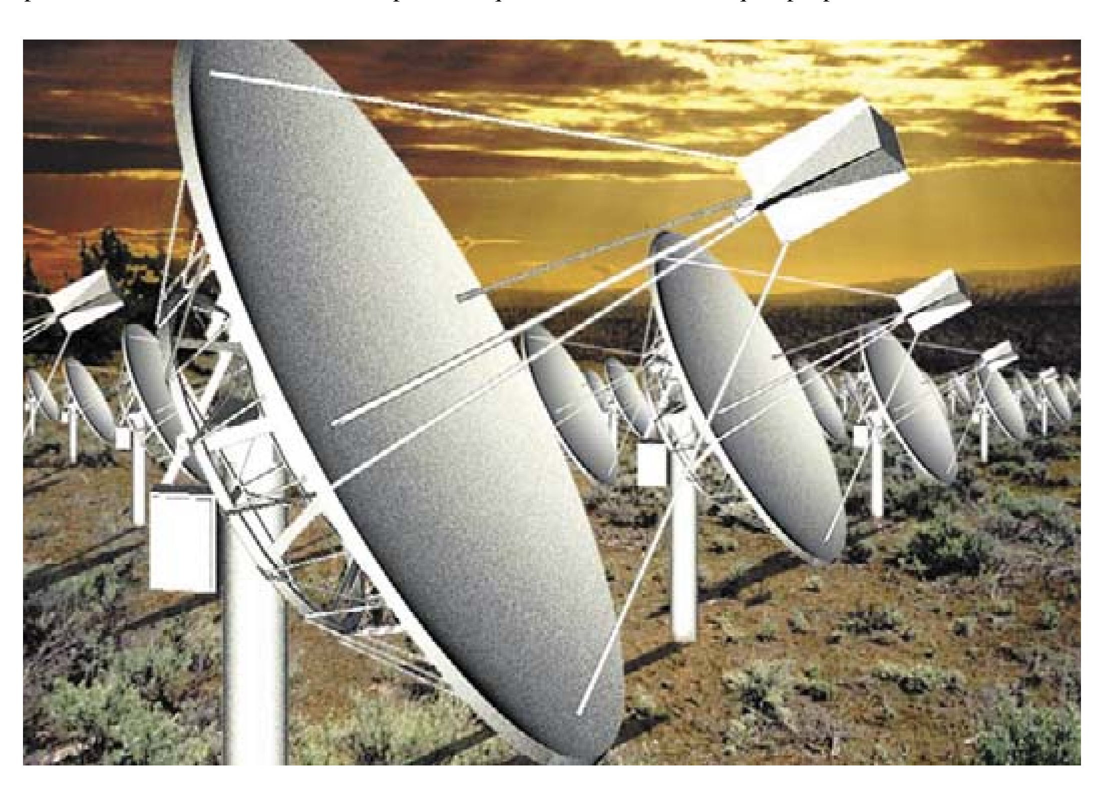
Las interferencias de radio podrían obligar a explorar desde **la cara oculta de la Luna**, tal vez desde el cráter Saha.

Pero la definición darwinista no resulta de gran utilidad en la exploración mediante naves espaciales. ¿Cuánto tiempo esperar para observar si un sistema químico es susceptible de evolución? La práctica impone que el enfoque darwinista ceda paso a definiciones menos rigurosas y más operativas. Tomemos los dispositivos experimentales que las naves gemelas *Viking* llevaron a Marte en 1976. Los investigadores adoptaron implícitamente una definición de naturaleza metabólica: confiaban en que la vida en Marte fuera reconocible por el consumo de ciertos compuestos químicos. Uno de los experimentos efectuados, el experimento de liberación-etiquetada (que verificaba si emanaba dióxido de carbono de una muestra de suelo marciano alimentada con nutrientes), sugería la presencia de organismos. Por usar las palabras de Chuck Klein, director del equipo de biología de los *Viking*, sus hallazgos "hubieran sido interpretados, casi con certeza, como indicios de una presumible actividad biológica" de no haber quedado en entredicho con datos resultantes de otros experimentos.

Enseñanzas de la misión *Viking*

Iban a bordo de las naves *Viking* un cromatógrafo de gases y un espectrómetro de masas, destinados a rastrear moléculas orgánicas. No hallaron ni una. Por eso, los resultados de liberación-etiquetada se atribuyeron a reacciones químicas imprevistas y no a procesos biológicos. Partían de una definición bioquímica de vida; lo mismo en Marte que en la Tierra, la vida debía apoyarse sobre el carbono orgánico.

De la experiencia del *Viking* hemos de extraer varias enseñanzas. La primera, que aunque debamos buscar la vida desde la perspectiva de definiciones dispares, parece indicado que prevalezca la definición bioquímica cuando haya que proceder por detección remota. Si no hay moléculas orgánicas, los resultados que sugieren una biología escondida pueden inducir a error. En segundo lugar, se ha de establecer el ambiente químico y geológico para poder interpretar presuntos hallazgos biológicos. Por último, los experimentos de detección de vida han de diseñarse de modo tal, que proporcionen información



2. La próxima generación de búsquedas de inteligencia extraterrestre será encomendada a grandes formaciones de pequeñas antenas parabólicas. El proyecto requiere cientos o incluso millares de antenas de televisión por satélite; en conjunto, ofrecen mejor sensibilidad, mayor cobertura de frecuencias y un comportamiento superior frente a las interferencias. El primero de tales instrumentos, llamado T1h (cuya superficie de recepción sumará en total una hectárea) está presupuestado en unos 25 millones de euros.

valiosa incluso con resultados negativos. Sobre todos esos aspectos se está reflexionando para acertar en misiones futuras; por ejemplo, con el instrumental a bordo de la primera sonda que ponga pie en Europa.

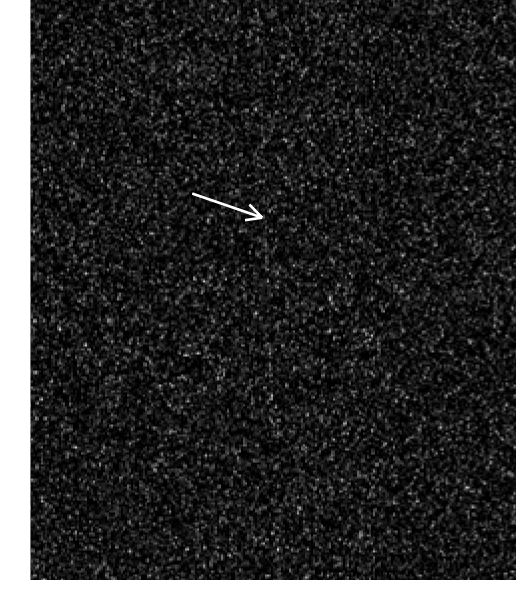
Además de instrumentos bioquímicos, no sobraría un microscopio, que ofrece la ventaja de no prejuzgar qué podría descubrirse. Pese a ello, la reciente controversia en torno al meteorito marciano Allan Hills 84001, en el que algunos afirman haber observado microfósiles, pone de manifiesto que la mera observación de rasgos microscópicos no basta para demostrar sin reparos la existencia de vida. Simple y llanamente, son demasiados los procesos inertes capaces de producir estructuras de apariencia biológica.

Tal vez sea Europa el lugar más prometedor para la existencia de vida extraterrestre en el sistema solar. Se acumulan los indicios de que alberga el segundo de los océanos existentes en el sistema solar, una masa de agua que probablemente ha permanecido cuatro mil millones de años cubierta por un caparazón de hielo. La exploración de Europa comenzará con una misión, cuyo lanzamiento está previsto para el año 2003; se propone resolver si el océano en cuestión se encuentra allí. Corroborado esto, el siguiente paso será un plan de exploración minuciosa —en la que podrían intervenir sondas que pongan pie en esa luna y, tal vez, submarinos capaces de perforar el caparazón helado— para verificar que en el océano hay vida. Cualquiera que sea el resultado, aprenderemos muchísimo sobre los límites de adaptación de la vida y sobre las condiciones en que puede surgir. En la Tierra, doquiera hay agua líquida hay vida, incluso en lugares inesperados, como en la corteza profunda.

Calisto, otro de los satélites jovianos, también presenta indicios de poseer un mar. La existencia de océanos subsuperficiales pudiera muy bien constituir un rasgo definidor de los grandes satélites helados del sistema solar exterior. De Titán, por ejemplo. Este satélite de Saturno se halla cubierto por una especie de neblina orgánica (*smog*), lo que nos ha impedido observar su superficie con el suficiente detalle. En el año 2004, la sonda Huygens se adentrará en su atmósfera, flotará por ella durante dos horas y enviará imágenes a la Tierra. En ciertos modelos se acepta que sobre la superficie de Titán pudieran fluir hidrocarburos líquidos. ¿Qué ocurriría si se combinaran tales compuestos orgánicos con agua líquida subsuperficial?

Inter(pla)net

Hacia el año 2050 habremos explorado la superficie de Marte y algo del subsuelo. De momento la NASA envía ya dos naves a Marte cada vez que la Tierra y el planeta rojo se hallan debidamente alineados, lo que acontece cada 26 meses. En las parrillas de proyectos se ordenan, además, micromisiones marcianas, esto es, demostraciones de técnica e infraestructura que aprovechan la superior capacidad de carga del cohete Ariane 5 de la Agencia Espacial Europea. Confiamos en que hacia el año 2010 se habrán establecido en Marte un sistema de posicionamiento global y una red de computadoras. En la Tierra, mediante ordenadores, podremos disfrutar de vídeo continuamente enviado desde exploradores robóticos situados en la superficie de Marte o sobre ella. En un sentido virtual, cientos de millones de personas se pasearán por Marte hasta familiarizarse con él. Con una Internet interplanetaria nos convertiremos en una civilización que abarca el sistema solar.



3. Las señales extraterrestres se presentan en forma de rayitas ligeramente sesgadas en un gráfico. Cada punto representa la detección de energía de radio a una frecuencia (*eje horizontal*) y en un momento (*eje vertical*) determinados. Los puntos dispersos corresponden a ruido; una línea representa una señal regular. En el caso de una señal extraterrestre, dicha línea está sesgada, porque la rotación de la Tierra provoca un corrimiento de frecuencia. Aquí la transmisión (*flecha*) procede de una nave espacial —una de las nuestras, la *Pioneer* 10, que en la actualidad dista del Sol 73 veces más que la Tierra.

De aquí a diez años, empezarán a llegar a la Tierra muestras de Marte. Pero los sitios ideales donde rastrear huellas de vida —fuentes termales, si existen, o nichos profundos que contengan agua líquida— pueden presentar dificultades insuperables para los robots y tal vez sea preciso el envío de exploradores humanos. Pese a tales contratiempos, cabe prever que hacia el 2050 se hayan establecido en Marte los primeros puestos permanentes de observación, con turnos de personal relevados regularmente. Humanos y robots trabajarán estrechamente en el barrido exhaustivo de las sedes más probables de vida, activa o fósil.

Si se descubriese vida en Marte, ¿qué relación guardaría con la nuestra? En los últimos diez años nos hemos convencido de que los planetas del sistema solar interior quizá no estuvieron biológicamente aislados entre sí. No es imposible que organismos viables hayan podido viajar entre Marte, la Tierra y Venus, incrustados en fragmentos pétreos proyectados por grandes impactos. De esta forma, el mundo donde primero se desarrolló la vida pudo luego inocularla en los demás. De existir vida en Marte, quizá compartiéramos con ella un antepasado común. En tal caso, la comparación de ADN nos ayudaría a determinar el mundo originario. Evidentemente, de haber tenido la vida en Marte un origen independiente de la vida en la Tierra, pudiera carecer por completo de ADN. El descubrimiento de un segundo génesis dentro de nuestro sistema solar haría pensar que la vida se desarrolla doquiera es viable; un tal hallazgo reforzaría los argumentos en favor de la ubicuidad de la vida en todo el universo.

Parte esencial de nuestra exploración de Marte y de otros mundos ha de ser la protección de los planetas. La NASA cuenta ya con directrices para proteger los mundos que visita de posibles contaminaciones por microorganismos llevados desde la Tierra.

Existen más planetas fuera de nuestro sistema solar que en sus dominios. Bastante antes

del 2050 las primeras misiones interestelares volarán por el exterior de nuestro sistema solar, quién sabe si sobre las alas de velas solares gigantescas. Estas sondas tomarán directamente muestras de la diversidad de compuestos orgánicos existentes entre las estrellas, hecho revelado ya por los radiotelescopios. No podrán alcanzar los sistemas estelares más cercanos en el 2050, pues con la técnica disponible el viaje exigiría decenas de miles de años, así que tendremos que estudiar tales sistemas desde la distancia.

Una ventana abierta a otros mundos

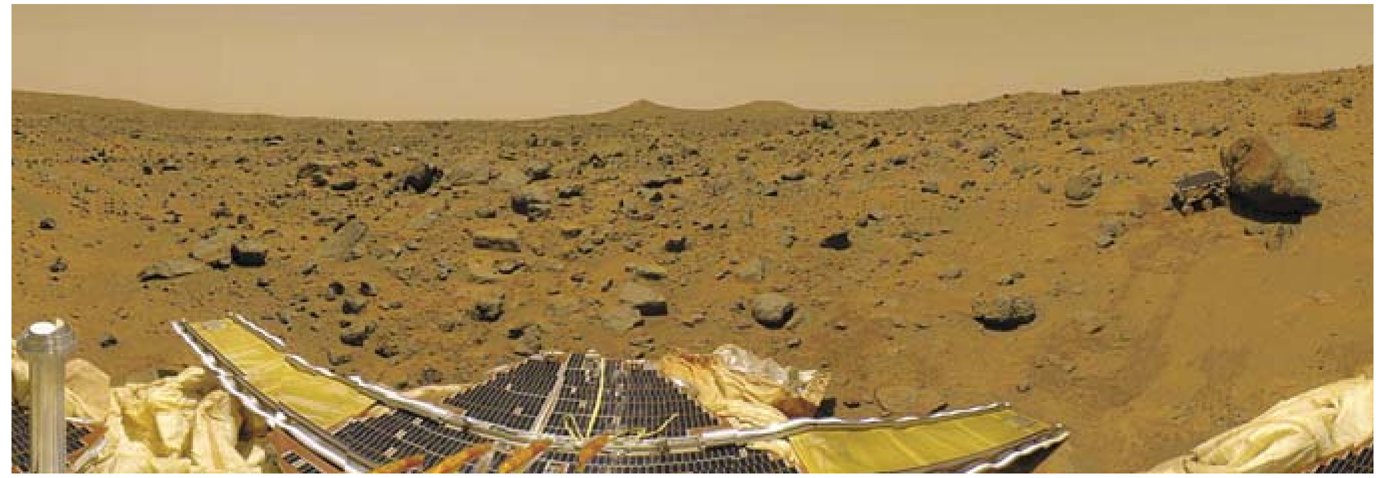
Hacia el año 2050 dispondremos de catálogos de sistemas planetarios extrasolares similares a los conocidos elencos de estrellas. Sabremos si nuestro propio sistema solar es típico o excepcional (aunque sospechamos que resultará no ser ni lo uno ni lo otro). En la actualidad, los únicos mundos que nuestra técnica logra detectar de una manera rutinaria son planetas gigantescos, de masa mayor que la joviana. Pero con telescopios avanzados, instalados en el espacio, detectaremos planetas del tamaño de la Tierra orbitando en torno a otras estrellas, si es que existen; asimismo, podremos analizar sus atmósferas en busca de rastros de procesos biológicos. Tales mundos se convertirán en objetivos obligados para observaciones ulteriores, sin olvidar la búsqueda de señales que pudieran revelar inteligencia extraterrestre (SETI, siglas de "Search for ExtraTerrestrial Intelligence").

En realidad se trata de hallar pruebas de técnicas extraterrestres. Podría ser preferible utilizar el acrónimo SET-T para reconocer que así es. Hasta la fecha nos hemos concentrado en una técnica muy específica, a saber, las transmisiones de radio a longitudes de onda con débil ruido de fondo natural y reducida absorción. Pero nadie ha descubierto y verificado todavía signos de una técnica distante. Ahora bien, el resultado nulo puede obedecer a limitaciones de alcance y de sensibilidad. La distancia a la estrella más lejana que ha sido directamente sondeada no llega siquiera al 1 por ciento del diámetro de nuestra galaxia.

Lo mismo que toda la radioastronomía, SETI se enfrenta a una crisis. El voraz apetito de la humanidad por técnicas que utilizan el espectro electromagnético está oscureciendo la ventana natural con cortinas de interferencias de radiofrecuencia. Esta tendencia podría acabar obligando a efectuar nuestra exploración desde la cara oculta de la Luna, único lugar del sistema solar que jamás tiene a la Tierra en el firmamento. Convenios internacionales han establecido ya una "zona apantallada" en la Luna, y algunos astrónomos han debatido la posibilidad de reservar el cráter Saha para radiotelescopios. Si la senda conducente a la exploración de Marte pasa por la Luna, la infraestructura necesaria pudiera hallarse instalada allá por el 2050.

4. Agazapados en las honduras de Marte (*abajo*) o de Europa (*arriba*) podrían hallarse seres que morasen en nuestro propio sistema solar. La superficie de Marte, surcada de cañones, mueve a pensar en un pasado de fuertes corrientes de agua. La superficie de Europa, un batiburrillo de icebergs, parece indicar un océano subterráneo. En la Tierra, las profundidades de la corteza terrestre o de los océanos albergan vida. ¿No podría, quizá, sobrevivir también en estos mundos?





Los planes de SETI para los dos o tres próximos decenios contemplan la construcción de un abanico de instrumentos con base terrestre que ofrezcan mayor sensibilidad, mayor anchura de banda y tiempo de observación más prolongado. Todos esos planes dependen ahora de financiación privada y filantrópica. En el caso de exploraciones en radiofrecuencias, se ha comenzado a trabajar con el "telescopio de una hectárea" (T1h), que permitirá el acceso simultáneo a toda la ventana de microondas. Un gran campo de observación —sumado a una enorme potencia de cómputo— permitirá la observación simultánea de docenas de objetos, combinando objetivos de SETI y el seguimiento de cuerpos astronómicos naturales. La radioastronomía y SETI podrán compartir recursos telescópicos, en vez de competir por ellos. El telescopio T1h hará ver que existe un procedimiento viable para construir un dispositivo de un kilómetro cuadrado (SKA, de "Square Kilometer Array"), que podría centuplicar la sensibilidad de cualquiera de los hoy disponibles. En el caso de SETI, este factor 100 se traduce en multiplicar por 10 la distancia observable y por 1000, el número de estrellas exploradas.

Estas instalaciones tendrán costos tolerables porque sus equipos materiales procederán de productos recientes destinados al mercado de consumo. En la medida de lo posible, su complejidad pasará de las estructuras de cemento y acero a los microcircuitos de silicio y a la programación. Empezaremos apostando por la ley de Moore, que afirma que la potencia de cómputo tiene crecimiento exponencial con el tiempo. El salvapantallas SETI@home, que han transferido a sus ordenadores más de un millón de personas de todo el mundo (www.setiathome.ssl.berkeley.edu), sirve de ilustración de la clase de computación en paralelo de que disponemos hoy mismo. En el 2050 habremos construido muchos SKA, que servirán para eliminar las interferencias, cada vez más intensas. De tener éxito, tales instrumentos serían más económicos que la instalación de un observatorio en la cara oculta de la Luna.

Recientemente están mereciendo atención bandas de longitudes de onda distintas de las de radio. Generaciones de admiradores del firmamento han examinado los cielos, a simple vista o con telescopios, sin llegar jamás a percibir un artefacto de astroingeniería. Pero, ¿y si tal instrumento lanzase sólo un destello de una milmillonésima de segundo? Acaban de empezar las primeras búsquedas, ciertamente limitadas, que intentan detectar destellos ópticos de muy breve duración. En los decenios venideros, las búsquedas SETI pueden avanzar hasta telescopios mucho mayores. Aunque las exploraciones iniciales fracasaran y no descubrieran otras civilizaciones, servirían cuando menos para sondear ruidos de fondo astrofísicos con muy elevadas resoluciones cronológicas.

El ritmo cada vez más rápido de la exploración del sistema solar proporcionará oportunidades adicionales para SETI. Deberíamos mantener bien abiertos nuestros ojos robóticos, atentos a sondas u otros artefactos de técnica extraterrestre. A pesar de las noticias sensacionalistas publicadas sobre individuos y artefactos extraterrestres presuntamente observados por todas partes, la exploración científica no ha revelado hasta la fecha ninguna prueba sólida de tales cosas.

Compartir el universo

Aunque no se pueda decir con seguridad que hacia el año 2050 tendremos noticia de seres inteligentes, sí podemos afirmar que todo cuanto nosotros sepamos, todos podrán saberlo. Quienquiera que sienta curiosidad podrá llevar la cuenta de las exploraciones efectuadas y podrá conocer en todo momento qué grupos están observando qué cosas y desde dónde lo están haciendo. Los datos generados por las búsquedas fluirán con demasiada rapidez para ser absorbidos por los humanos, pero las señales interesantes, cribadas por los chips de silicio, estarán disponibles para su examen.

Si hacia el 2050 no hemos encontrado prueba alguna de técnica extraterrestre, pudiera ser porque la inteligencia técnica casi nunca evoluciona o porque las civilizaciones técnicas traen rápidamente consigo su propia destrucción. Quizá también porque no hemos llevado a cabo una búsqueda adecuada basada en una estrategia correcta. Si la humanidad sigue aquí en el 2050 y es todavía capaz de búsquedas SETI, ello querrá decir que nuestra técnica no ha provocado nuestra propia destrucción. Hacia esa fecha podría considerarse la emisión activa de una señal, con la esperanza de que alguien la encuentre. En ese momento tendremos que afrontar las difíciles preguntas de quiénes van a hablar en nombre de la Tierra y qué van a decir.

LOS AUTORES



JILL C. TARTER participó en su primera búsqueda de inteligencia extraterrestre en 1976, mientras completaba su formación astrofísica en la Universidad de California en Berkeley. Directora de investigación del Instituto SETI en Mountain View, dispone ahora de un instrumental 1000 veces más sensible.



CHRISTOPHER F. CHYBA es un experto en sistemas planetarios cuya investigación se centra en los orígenes de la vida y en la exobiología. Ha estado al frente del Equipo de Definición Científica de la misión del *Orbiter* que en el 2003 la NASA enviará a Europa. En el Instituto SETI es titular de una cátedra dotada por Carl Sagan, que fue director de su tesis doctoral.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EXTRATERRESTRIALS —WHERE ARE THEY? Selección de Ben Zuckerman y Michael H. Hart, Cambridge University Press, 1995.

THE ORIGIN OF LIFE IN THE SOLAR SYSTEM: CURRENT ISSUES. Christopher F. Chyba y Gene McDonald en *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 23, páginas 215-249; 1995.

SHARING THE UNIVERSE: PERSPECTIVES ON EXTRATERRESTRIAL LIFE. Seth Shostak. Berkeley Hills Books, 1998.

El apogeo de los robots

Hacia el 2050 los "cerebros" basados en computadores que ejecutan 100 billones de instrucciones por segundo empezarán a rivalizar con la inteligencia humana

Hans Moravec

En los últimos años, la expansión de Internet y la multiplicación de la potencia, las funciones y la movilidad de los ordenadores han dejado muy atrás las predicciones iniciales sobre el ritmo de progreso de la técnica y su utilidad para la vida diaria. Los expertos más avisados piensan ahora en un mundo saturado de potentes microprocesadores, que gradualmente invadirán nuestros mecanismos, viviendas, ropas e incluso nuestro cuerpo.

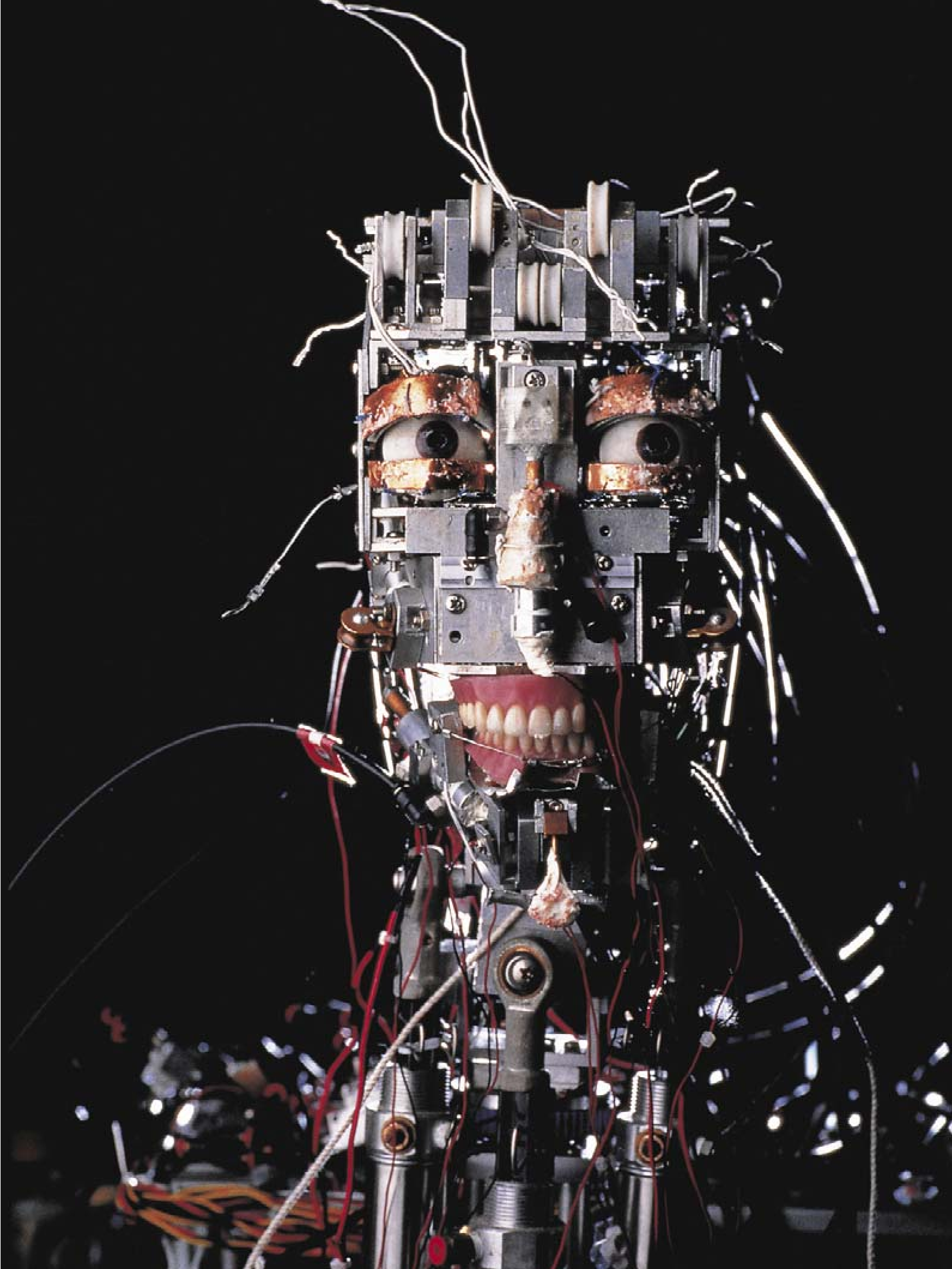
Pero hay un objetivo que se resiste. En fuerte contraste con la irrupción de los ordenadores en nuestra vida, en gran parte no prevista, el desarrollo de la robótica ha incumplido las predicciones formuladas en los años cincuenta. Por aquel entonces, deslumbrados por la capacidad aparentemente milagrosa de los ordenadores para el cálculo, los expertos creyeron que bastaba con escribir la programación adecuada para convertir los ordenadores en cerebros artificiales de complicados robots autónomos. Dentro de una o dos décadas, suponían, estos robots barrerían el suelo, cortarían el césped y, por decirlo en breve, terminarían por exonerarnos de los trabajos fatigosos.

Es obvio que esto no ha sucedido. Los robots industriales han transformado la fabricación de automóviles, entre otros frentes. Pero ese tipo de automatización dista mucho de las creaciones versátiles, móviles y autónomas que científicos e ingenieros habían esperado. En el desarrollo de tales máquinas se han desanimado oleadas de investigadores y han cerrado numerosas empresas que pretendían iniciarse en este campo.

Lo inalcanzable no es el "cuerpo" mecánico. Existen ya brazos articulados y otros mecanismos móviles adecuados para el trabajo manual, como demuestran los robots de la industria. En cambio, el cerebro artificial computarizado todavía se halla muy por debajo del nivel de refinamiento que exige un robot humanoide.

Estoy convencido, no obstante, de que en un futuro no muy lejano se hará realidad el sueño, acariciado durante décadas, de un robot autónomo útil, de finalidad múltiple.

1. Rostro robot que se utiliza en la Universidad de Ciencias de Tokio para investigar las expresiones emocionales con las que pueden responder las máquinas. La comunicación no verbal será importante para posteriores generaciones de robots, pues les permitirá interactuar con los humanos de un modo más fluido.



Hacia el 2010 podremos ver robots móviles, de talla humana y facultades cognitivas comparables a las de un lagarto. Las máquinas realizarán tareas domésticas sencillas, como pasar la aspiradora, limpiar el polvo, cargar paquetes y sacar la basura. Allá por el 2040, me atrevo a decir, alcanzaremos finalmente la meta original de la robótica, etapa fundamental de la ciencia-ficción: una máquina con libertad de movimientos dotada de las facultades intelectuales de un ser humano.

Razones para el optimismo

A la luz de lo expuesto sobre las fallidas expectativas de la robótica, ¿por qué sostengo que cabe esperar rápidos progresos y logros sorprendentes? Mi confianza se basa en los avances recientes en electrónica e informática, así como en observaciones propias realizadas en robots, ordenadores e incluso en insectos, reptiles y otros seres vivos durante los últimos treinta años.



En diez o veinte años, creen los expertos, habrá robots que nos limpien los suelos, corten el césped y, en general, **destierren de nuestra vida los trabajos fatigosos.**

No hay mejor razón para el optimismo que la constante superación de las prestaciones de los ordenadores fabricados en serie durante los últimos años. En los setenta y los ochenta era fácil conseguir ordenadores para robótica capaces de ejecutar un millón de instrucciones por segundo (MIPS). Cada instrucción representaba una tarea básica, como sumar números de 10 dígitos o almacenar el resultado en una posición de memoria determinada.

En los años noventa, la potencia de un ordenador apto para controlar un robot de investigación se elevó a 10 MIPS, luego a 100 MIPS y recientemente ha llegado a 1000 MIPS para ordenadores de sobremesa de gama alta. El nuevo ordenador portátil iBook de Apple ejecuta más de 500 MIPS. Por eso se aproximan a la viabilidad comercial funciones que en los años setenta y ochenta sobrepasaban en mucho las capacidades de los robots.

Como ejemplo, en octubre de 1995 Navlab V, un vehículo experimental, atravesó los Estados Unidos desde Washington hasta San Diego, conduciéndose a sí mismo durante más del 95 por ciento del tiempo. La autonomía y el sistema de navegación del vehículo radicaban en un portátil de 25 MIPS con microprocesador de Sun Microsystems. El Navlab V fue construido por mi Instituto de Robótica de la Universidad Carnegie Mellon. Otros investigadores de EE.UU. y de Alemania han construido vehículos robot similares, que han recorrido miles de kilómetros por autopista, sometidos a todo género de condiciones climáticas y de tráfico.

En otros experimentos de los últimos años, los robots móviles navegaron por oficinas de estructura desconocida y las cartografiaron. Mediante sistemas informáticos de visión, se localizaron objetos por su textura y se realizaron el seguimiento y análisis de rostros en tiempo real. Mientras tanto, los ordenadores personales se capacitaban mucho más en el reconocimiento de los textos y el habla.

Pese a todo, los ordenadores no pueden competir hoy con los humanos en las funciones de reconocimiento y navegación. Esto ha intrigado por largo tiempo a los expertos, dado que los ordenadores nos aventajan mucho en el cálculo. Esta aparente paradoja se explica porque el cerebro humano, en su integridad, no es un verdadero ordenador programable, de uso general —lo que los informáticos llaman una máquina universal—, como son casi todos los ordenadores actuales.

Para comprender esto hay que traer a cuento nuestra evolución. Nuestros antepasados para sobrevivir tenían que hacer varias cosas, muchas veces y muy bien: encontrar comida, escapar a los depredadores, copular y proteger su descendencia. Esas tareas dependían de la capacidad del cerebro para reconocer y recorrer los espacios. Al cabo de cientos de millones de años de evolución, nuestro cerebro llegó a ser una especie de ordenador ultrarrefinado, si bien de aplicación especializada.

Por supuesto, la capacidad de efectuar cálculos matemáticos no tenía ningún valor para la supervivencia. Con todo, según transformaba el lenguaje la cultura humana, al menos una pequeña parte de nuestro cerebro evolucionó hacia una máquina clasificadora universal. Un rasgo distintivo de esa máquina es su capacidad de seguir un conjunto de instrucciones arbitrario, que podían transmitirse y realizarse por medio del lenguaje. Pero nosotros visualizamos los números como unas formas complejas, los escribimos y realizamos operaciones con ellos, y esto hace que procesemos las cifras de un modo sumamente extraño e ineficaz. Utilizamos cientos de miles de millones de neuronas para hacer, en unos minutos, lo que sólo unos cientos de ellas, “conexionadas” especialmente y preparadas para el cálculo, pueden lograr en unos milisegundos.

Hay una pequeñísima proporción de personas que nacen con asombrosas facultades para los cálculos mentales. En términos absolutos, pueden calcular unas 100 veces

más deprisa que una persona normal. Pero ello es despreciable frente al ordenador, que opera a velocidades millones o miles de millones de veces superiores.

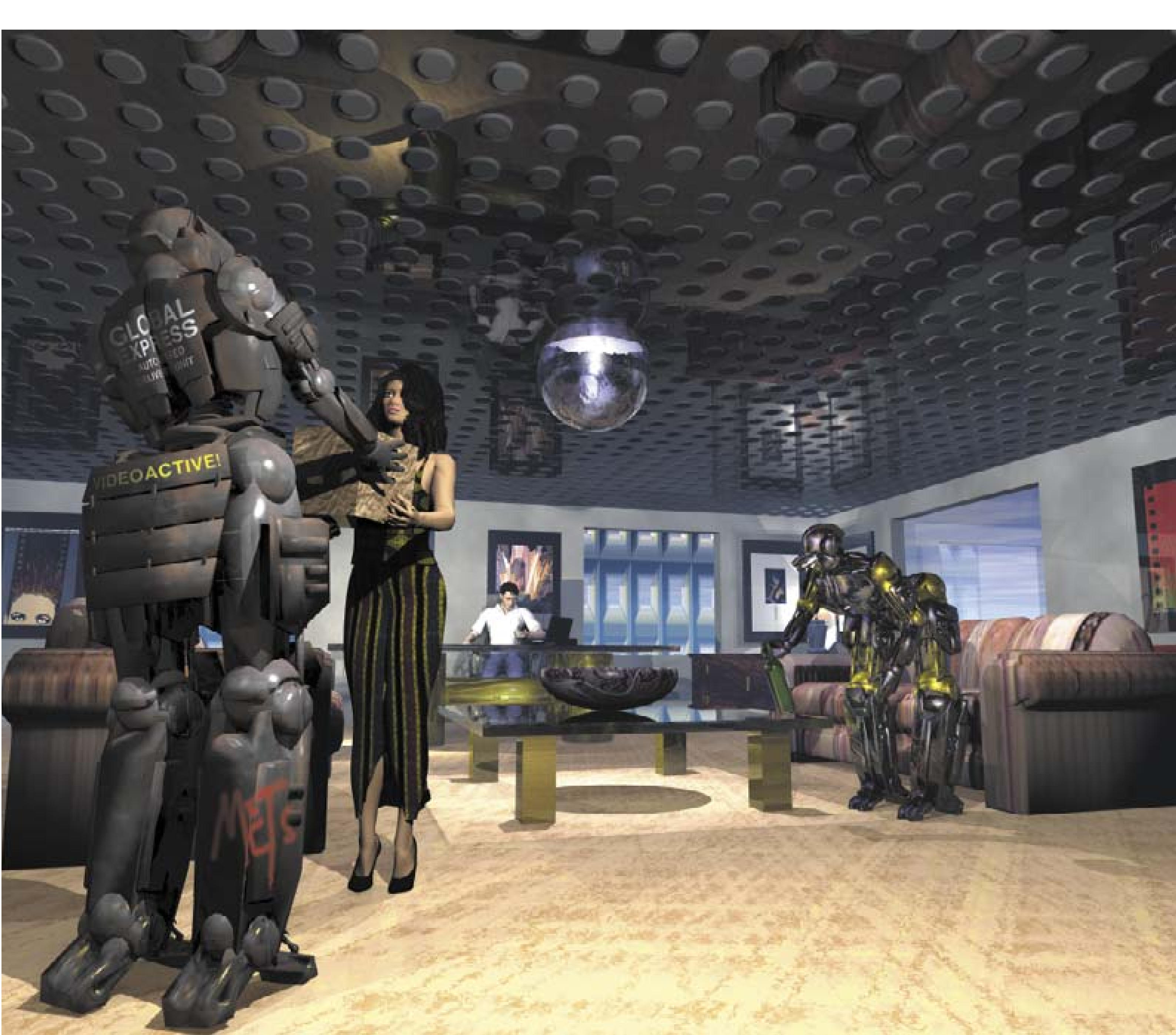
¿Es posible simular con circuitos la actividad cerebral?

Los expertos en robótica se enfrentan al reto de programar ordenadores de uso general para que se ajusten al cerebro humano, especializado en gran medida, con su herencia de percepciones ultraoptimizada y otros rasgos evolutivos exclusivos. Los ordenadores que hoy controlan robots son demasiado endebles para poder aplicarse con éxito a este trabajo, pero es sólo cuestión de tiempo el que alcancen la capacidad necesaria.

En mi afirmación de que los ordenadores llegarán a ser capaces de la misma clase de percepción, cognición y pensamiento que los humanos, va implícita la idea de que puede construirse un sistema artificial suficientemente avanzado y refinado —como sería uno electrónico—, y programarlo para hacer las mismas cosas que el sistema nervioso humano, incluido el cerebro. Este tema es sujeto de controversia precisamente ahora, y hay que admitir la discrepancia de personas de relieve.

La pregunta esencial de este asunto es si la estructura biológica y el comportamiento tienen un origen físico y, además, si la ley física es computable, esto es, susceptible de simulación por ordenador. Mi opinión es que no existen pruebas científicas sólidas para negar ninguna de estas proposiciones. Antes bien, hay indicaciones apremiantes de que ambas son verdaderas.

La biología molecular y la neurociencia están continuamente descubriendo mecanismos físicos que subyacen a la vida y a la mente, pero hasta ahora han tratado sobre



2. Los robots de tercera generación tendrán “cerebros” capaces de procesar cinco billones de instrucciones por segundo, lo que les dará una inteligencia similar a la del mono y les permitirá ejecutar tareas rutinarias manuales y domésticas.



3. El robot lanzadera traslada a la gente por una zona predefinida, autolocalizándose por medio de una red de imanes dispuesta en el suelo. La compañía Frog de Utrecht, que lo ha fabricado, tomó su nombre ("rana" en español) del acrónimo inglés "free ranging on grid" (libre circulación sobre un enrejado).

todo los más simples. El indicio de que pueden componerse funciones simples para conseguir las capacidades superiores del sistema nervioso proviene de programas que leen, reconocen la voz, guían los brazos de robots para montar por el tacto ajustados componentes, clasifican sustancias químicas por el gusto y el olor artificiales, razonan sobre materias abstractas, y así sucesivamente. Sin duda, los ordenadores y los robots de hoy no pueden competir con humanos, ni siquiera con animales. Pero esta situación es comprensible a la luz de lo expuesto en el apartado siguiente, en el que se establece que los ordenadores actuales sólo tienen potencia suficiente para emular los sistemas nerviosos de insectos. Y según mi experiencia, los robots se comportan como insectos en tareas simples.

Las hormigas, por ejemplo, pueden seguir rastros por el olor, pero se desorientan cuando el rastro se interrumpe. Las polillas siguen pistas de feromonas y también se valen de la luna como guía. A su imagen, muchos robots comerciales siguen hilos de guía instalados bajo la superficie sobre la que se mueven; otros se orientan a sí mismos por medio de láseres que leen códigos de barras en las paredes.

Si resulta cierta mi hipótesis de que el desarrollo de ordenadores más potentes terminará por alcanzar un nivel comparable al humano, podremos esperar que los robots igualen y sobrepasen las capacidades de diversos animales, y en último término del ser humano, cuando la velocidad de procesamiento sea suficientemente elevada. Por otra parte, si el supuesto es erróneo tendremos algún día que encontrar habilidades propias de animales o de personas que no puedan materializarse en robots, aunque éstos tengan una potencia de procesamiento equivalente a la del cerebro entero. Se plantearía entonces un fascinante reto científico: aislar e identificar la capacidad fundamental que posean los humanos y de la cual carezcan los ordenadores. Todavía no hay ninguna prueba de que esto suceda.

La segunda proposición, que la ley física sea susceptible de simulación informática, está cada vez más fuera de discusión. Se ha conseguido ya simular, a diversos niveles de abstracción y aproximación, innumerables situaciones útiles, desde colisiones de automóviles hasta las fuerzas de "color" que aglutinan a los quarks y gluones para constituir protones y neutrones.

Tejidos nerviosos y computación

Si aceptamos que los ordenadores llegarán a alcanzar potencia suficiente para emular la mente, surge inmediata la pregunta: ¿qué velocidad de procesamiento se necesitará para comportarse al nivel del cerebro humano? Para explorar posibles respuestas, he analizado las capacidades de la retina en los vertebrados, que al ser bien conocidas pueden servir como piedra de la Rosetta para descifrar la operación del tejido nervioso en términos de computación. Comparando la velocidad a la que operan los circuitos neuronales de la retina para el procesamiento de imágenes con el número de instrucciones por segundo que necesita un ordenador para realizar un trabajo semejante, creo posible estimar, de una forma tosca al menos, la potencia de procesamiento de información de ese tejido y, por extrapolación, la del sistema nervioso humano en su totalidad.

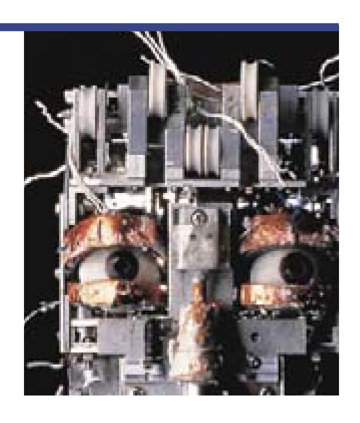
La retina humana es un trozo de tejido nervioso situado en el fondo del globo ocular, de medio milímetro de espesor y unos dos centímetros de anchura. Casi exclusivamente la componen células sensoras de la luz, pero una décima de milímetro de su espesor lo ocupan circuitos de procesamiento de imagen capaces de detectar los bordes (transiciones de luz a oscuridad) y el movimiento en cerca de un millón de diminutas zonas de la imagen. Cada una de dichas zonas está asociada con una fibra propia en el nervio óptico, y realiza en torno a 10 detecciones por segundo de un borde o un movimiento. Los resultados circulan hacia el interior del cerebro a lo largo de esa fibra asociada.

Por mi larga experiencia en sistemas de visión robotizada, sé que ese grado de detección de perfiles o movimientos, realizada con un programa eficaz, requiere ejecutar al

menos 100 instrucciones de ordenador. Así pues, alcanzar los 10 millones de detecciones por segundo de la retina exige una capacidad superior a 1000 MIPS.

El cerebro humano entero pesa unas 75.000 veces más que los 0,02 gramos de la circuitería de procesamiento de imagen en la retina. Eso implica que en cifras redondas se necesiten 100 millones MIPS (100 billones de instrucciones por segundo) para emular un cerebro humano de 1500 gramos. Los ordenadores personales de 1999 vencen a los cerebros de algunos insectos, pero son derrotados por la retina humana e incluso por los 0,1 gramos de cerebro de un pececillo de río. Para comportarse como el cerebro humano un PC típico tendrá que multiplicar al menos por un millón su potencia.

Al preguntarle por qué hay velas sobre la mesa, **un robot de tercera generación** podría responder que las puso allí porque a su dueño le gusta cenar con velas y él quiere complacerle.



Capacidad cerebral y utilidad

Aunque desaliente a los expertos en inteligencia artificial, este inmenso déficit no significa que la meta de un cerebro artificial humanoide sea inalcanzable. La potencia de procesamiento para un determinado precio ha venido duplicándose año tras año en los noventa, tras haberse duplicado cada 18 meses en los años ochenta y cada dos años anteriormente. Semejante progreso posibilitó, antes de 1990, una gran reducción del coste y el tamaño de los ordenadores que controlan robots. Así, el coste cayó en picado, y el tamaño pasó de llenar una habitación hasta poderse llevar en la mano. La potencia se mantenía entretanto en torno a 1 MIPS. A partir de 1990, las reducciones de coste y tamaño han descendido, pero la potencia del ordenador se ha elevado hasta rondar los 1000 MIPS. A este ritmo, en 30 a 40 años se podrá cubrir el salto que supone multiplicar por un millón. Todavía hay algo mejor: los robots no necesitan toda la capacidad cerebral humana para ser útiles.

Las experiencias en la investigación y en el terreno comercial me han convencido de que la capacidad mental de un pececillo —unos 1000 MIPS— es suficiente para guiar de manera fiable robots móviles de utilidad en entornos no conocidos; los convierte, pues, en apropiados para trabajar en cientos de miles de instalaciones industriales y finalmente en muchos millones de hogares. Tales máquinas se encuentran a tiro de una década, pero se han resistido durante tanto tiempo, que hoy sólo se dedican a ellas unas docenas de pequeños grupos investigadores.

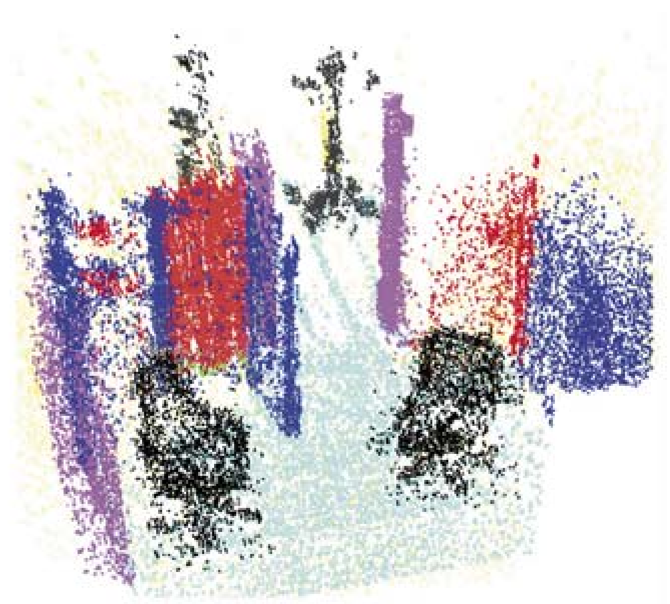
Los robots móviles comerciales —hasta ahora los más inteligentes, equiparables a insectos a 10 MIPS— han encontrado pocas aplicaciones. En todo el mundo sólo trabajan unos 10.000, cifra despreciable; las compañías que los fabricaron luchan por sobrevivir o ya han perecido. (Los fabricantes de robots de manipulación no tienen mucho más éxito.) Los robots móviles que más abundan son los vehículos de guía automática (AGV), que transportan materiales en fábricas y almacenes. En su mayoría, van siguiendo hilos enterrados que emiten señales y detectan puntos extremos y colisiones mediante conmutadores, técnica desarrollada en los años sesenta.

Cuesta decenas de millones de pesetas instalar los hilos de guía bajo los suelos de hormigón. Las rutas a seguir quedan entonces fijas. Por tanto, los robots sólo serán rentables para factorías grandes y de



4. El robot P_3 costó cientos de millones de pesetas y es uno de los relés autónomos más avanzados que hoy existen. Su primera habilidad consiste en caminar, ya sea subiendo o bajando escaleras o sobre terreno llano o inclinado. Por desgracia, al cabo de 25 minutos se le agotan las baterías. Fue construido por Honda Motors en Japón.





5. La visión por robot transportaría los elementos esenciales de una escena a un mapa útil para la navegación. Los mapas más recientes, como el de la derecha, son tridimensionales y contienen detalles hasta del orden de centímetros. El mapa se construyó a partir de 20 imágenes estereoscópicas.

excepcional estabilidad. Tras la aparición de los microprocesadores en los ochenta pudieron construirse robots que siguen pistas más flexibles, como imanes o patrones ópticos insertados en suelos enlosados, y que utilizan sensores de proximidad por ultrasonidos e infrarrojos para detectar obstáculos y negociar el modo de salvarlos.

Los robots industriales más avanzados, desarrollados al final de los ochenta, están guiados por marcadores de navegación ocasionales —por ejemplo, códigos de barras explorados por láser— y por elementos que ya existían, tales como paredes, esquinas y puertas. El oneroso tendido de los hilos de guía se sustituye por una programación personalizada que se acomoda minuciosamente a cada segmento de la ruta. Las empresas que desarrollaron estos robots encontraron muchos clientes industriales deseosos de automatizar el transporte, la limpieza de suelos, las patrullas de vigilancia y otras tareas rutinarias. Por desgracia, la mayoría de ellos perdieron interés al comprobar que la instalación y las variaciones de rutas exigían un trabajo largo y costoso de expertos programadores de rutas, no siempre disponibles. Pese a su éxito técnico, los robots resultaron un fiasco comercial.

Dentro de su fracaso, no obstante, revelaron factores esenciales para el éxito. El primero, que los vehículos físicos preparados para tareas diversas tengan precios razonables. Afortunadamente, es posible convertir al régimen de autonomía los AGV, carretillas elevadoras, fregadoras de suelos y otras máquinas industriales existentes, diseñadas para ser manejadas por personas o para seguir hilos de guía. El segundo, que el cliente no se vea obligado a llamar a especialistas cada vez que ponga en marcha el robot o cambie su rutina; el coste, el tiempo y la incertidumbre de una instalación por expertos no pueden recaer sobre tareas tan corrientes como la limpieza del suelo, por ejemplo. El tercer factor es que los robots trabajen fiablemente al menos durante seis meses sin encontrar problema o situación alguna que exija perder tiempo para su reparación o reprogramación. Los clientes rechazaban sin contemplaciones los robots que, tras funcionar sin fallos un mes, se quedaban encajados en los rincones, andaban extraviados, pisaban los pies de los empleados o se desplomaban por las escaleras. Sin embargo, seis meses dan derecho a un día de indisposición de la máquina.

Hay robots que llevan años trabajando sin fallos, perfeccionados por un proceso iterativo que repara las averías más frecuentes y revela problemas cada vez más raros que a su vez se corrigen. Desgraciadamente, este género de fiabilidad sólo se ha conseguido en rutas predeterminadas. Un ordenador de 10 MIPS, comparable al cerebro de un insecto, basta para seguir unos pocos jalones colocados a mano en cada segmento de la trayectoria del robot. Es fácil que estos robots se confundan por pequeñas sorpresas, tales como códigos de barras desplazados o pasillos bloqueados (en eso no se diferencian mucho de las hormigas apartadas de un rastro oloroso o de la polilla que confunde la luz de una farola con la luna).

El sentido del espacio

A mediados de los noventa, cuando los microprocesadores alcanzaron los 100 MIPS, en los laboratorios aparecieron robots que cartografiaban sus propias rutas. En su mayoría, construyen mapas bidimensionales basados en exploraciones por sonar o telémetro para localizarse y autoguiarse, y las mejores versiones parecen aptas para navegar durante días por los pasillos de una oficina

sin desorientarse. Desde luego, todavía se quedan atrás frente al criterio comercial de los seis meses. Con demasiada frecuencia las diferentes posiciones de un mapa toscamente dibujado se asemejan entre sí. A la inversa, una misma posición, explorada desde distintas alturas, parece diferente, o bien pasan inadvertidos pequeños obstáculos o extrañas protuberancias. Pero los sensores, los ordenadores y las técnicas progresan incesantemente, y el éxito ya se divisa.

Mi pequeño laboratorio compite en esta carrera. En los años ochenta ideamos un procedimiento para verter en mapas fiables grandes cantidades de datos ruidosos captados por sensores. Para ello se acumulaban datos estadísticos sobre la ocupación o el vacío de cada célula de una retícula que representaba los alrededores. Este método dio buen resultado en dos dimensiones y sirve de guía a muchos de los robots antes descritos.

Los mapas tridimensionales, de riqueza 1000 veces mayor, prometen ser muy superiores, pero durante años parecían fuera del alcance a efectos de computación. En 1992 utilizamos economías de escala y otros recursos para reducir a la centésima parte el coste de tales mapas. Disponemos ahora de un programa de pruebas que recopila miles de mediciones tomadas por cámara estereoscópica para levantar el mapa en volumen de una habitación, reducido a escala de centímetros. Con 1000 MIPS, el programa asimila más de una toma por segundo, adecuado para un desplazamiento lento por interiores.

Robot en versión 1.0

Por ahora el procesamiento a 1000 MIPS sólo aparece en PC de sobremesa de gama alta. Dentro de pocos años se extenderá también a los ordenadores portátiles u otros similares, menores y de precio asequible, adecuados para robots. En preparación de ese día, iniciamos recientemente un proyecto trienal intensivo para desarrollar un prototipo de productos comerciales basados en dicho ordenador. Nos proponemos automatizar los procesos de aprendizaje para optimizar cientos de parámetros de evaluación de pruebas, así como escribir programas que localicen caminos despejados, posiciones, suelos, muros, puertas y otros objetos en los mapas tridimensionales. También ensayaremos programas que combinan las capacidades básicas en tareas más amplias, como son las de reparto, limpieza del suelo y vigilancia de seguridad.

El banco de pruebas inicial será un pequeño robot móvil revestido de cámaras fotográficas. Su inteligencia provendrá de dos ordenadores: un portátil Apple iBook, transportado por el propio robot, y una máquina externa de 1000 MIPS basada en el Apple G4 que se comunica de modo inalámbrico con el iBook. Los diminutos chips de las cámaras digitales, fabricados en masivas series, ofrecen la solución más económica para obtener los millones de mediciones que requieren unos mapas detallados.

Como primer producto comercial, tenemos en proyecto una "cabeza de navegación" del tamaño de una pelota de baloncesto, capaz de incorporarse a los vehículos industriales existentes. Contaría con múltiples cámaras estereoscópicas, programas genéricos para cartografía, reconocimiento y control, un programa distinto para una aplicación específica (tal como la limpieza de suelos) y una conexión física a la alimentación, controles y sensores del vehículo. Si está equipado con esta cabeza, un vehículo programado para misiones de transporte o vigilancia puede aprender nuevas rutas sólo por haberlas recorrido una vez. A los programas de limpieza de suelos se les mostrarían asimismo los límites de su área de trabajo.

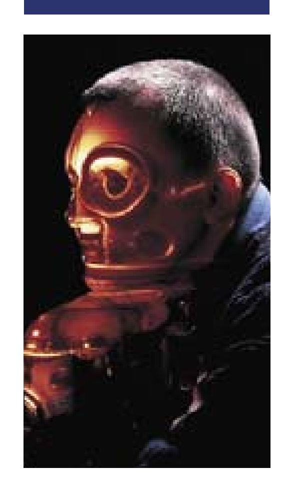
Ubicados en una posición de trabajo, los vehículos comprenderían el entorno sujeto a variaciones que les rodea con fundamentos suficientes para funcionar al menos seis meses sin errores. Hay diez mil AGV, 100.000 máquinas limpiadoras y tal vez un millón de carretillas elevadoras que pueden beneficiarse de esta mejora, y la robotización podría ampliar enormemente esos mercados.

Rápida renovación

Los ingresos y la experiencia que proporcionen los robots industriales con sensibilidad espacial sentarán las bases de productos de consumo más inteligentes y también más baratos. Los primeros podrían ser aspiradoras robot que aprendan automáticamente a desplazarse por la casa, exploren habitaciones desocupadas y limpien siempre que se necesite. Cabe imaginar una máquina que por su reducida altura quepa debajo de algunos muebles, con un cepillo extensible aún más bajo y que regrese a una estación de acoplamiento para recargarse y vaciar su carga de polvo. Estas máquinas podrían abrir un mercado de masas a los robots.

El éxito comercial estimulará la competencia y acelerará la inversión en fabricación, ingeniería e investigación. Las aspiradoras robot deberían dar origen a robots de limpieza más inteligentes con brazos para aspiración, fregado y recogida, a los que seguirían robots de utilidad equipados con brazos más fuertes y más diestros, y sensores más perfeccionados. Se escribirán programas para que estas máquinas recojan restos en desorden, almacenen, retiren y entreguen cosas, hagan inventarios, custodien los hogares, abran las puertas, corten el césped, presenten juegos y un largo etcétera. Habrá aplicaciones nuevas que extiendan el mercado y fomenten ulteriores progresos cuando los robots queden faltos de agudeza, precisión, fuerza, alcance, destreza, habilidad o potencia de procesamiento. La capacidad, las cifras de ventas, la calidad de la ingeniería y la fabricación y el buen rendimiento

EL AUTOR



HANS MORAVEC investiga en el Instituto de Robótica de la Universidad Carnegie Mellon. En los últimos 40 años ha trabajado en ocho robots móviles: el primero, cuando tenía 10 años, no era más que un amasijo de latas, baterías y lámparas con un motor. Su trabajo actual se centra en potenciar los robots para que puedan determinar su posición y sus movimientos mediante una percepción tridimensional del entorno.

económico irán aumentando según una espiral en la que se refuerzan mutuamente. Quizás hacia el 2010 el proceso habrá producido los primeros “robots universales”, de la inteligencia de un lagarto, que procesan 5000 MIPS y pueden programarse prácticamente para cualquier tarea simple.

A semejanza de los reptiles competentes aunque guiados por el instinto, los robots universales de la primera generación atenderán sólo las contingencias que hayan previsto explícitamente sus programas de aplicación. Al no poder adaptarse a circunstancias variables, a menudo funcionarán con escasa eficacia o no funcionarán en absoluto. Es tanto el trabajo físico que les aguarda en empresas, calles, campos y hogares que la robótica podría adelantar a la pura técnica de la información en el terreno comercial.

Una segunda generación de robots universales con capacidad de 100.000 MIPS, comparable a la de un ratón, podrá adaptarse como no lo hacen los de la primera generación e incluso admitirá adiestramiento. Además de los programas de aplicación, estos robots albergarán una serie de “módulos acondicionadores” de lógica que generarán señales de refuerzo positivas y negativas en circunstancias predefinidas. Por ejemplo, realizar los trabajos con rapidez y mantener cargadas las baterías será positivo, pero golpear o romper algo será negativo. Habrá otras maneras de dar cumplimiento a cada etapa de un programa de aplicación, desde el detalle minucioso (agarrar el mango con la palma abajo o la palma arriba) hasta la indicación general (trabajar en el interior o en el exterior). Como las tareas se repiten, se verán favorecidas las alternativas que den lugar a un refuerzo positivo, y se esquivarán las que den resultados negativos. De un modo lento pero seguro, los robots de la segunda generación funcionarán cada vez mejor.

En una tercera generación de robots que trabajen a cinco millones de MIPS, como el cerebro de un mono, las máquinas aprenderán muy deprisa a partir de ensayos mentales en simulaciones que emulan factores físicos, culturales y psicológicos. Las propiedades físicas incluyen la forma, el peso, la fuerza, la textura y apariencia de los objetos y el modo de manipularlos. Entre los aspectos culturales figuran el nombre del objeto, su valor, posición correcta y finalidad. Los factores psicológicos, aplicados a humanos y robots afines, comprenden objetivos, creencias, sentimientos y preferencias. Desarrollar los simuladores adecuados será un ingente empeño en el que participarán miles de programadores y robots que acopiarán experiencias. La simulación seguirá el curso de los eventos externos y ajustará sus modelos para mantenerlos fieles a la realidad. Así los robots podrán aprender por imitación y acceder a algún tipo de consciencia. Al preguntarle por qué hay velas sobre la mesa, un robot de la tercera generación podría consultar su simulación de la casa, del dueño y de sí mismo para contestar que las puso allí porque al dueño le gusta cenar con velas y él quiere complacer a su amo. Otras nuevas preguntas revelarían más detalles de una sencilla vida mental interior que sólo se preocupa de situaciones y personas concretas en su área de trabajo.

Los robots universales de la cuarta generación, capaces como la mente humana de procesar 100 millones de MIPS, poseerán capacidades de abstracción y generalización, resultado de combinar potentes programas de razonamiento con las máquinas de la tercera generación. Estos programas de razonamiento serán herederos, con refinamiento mucho mayor, de los actuales sistemas expertos y demostradores de teoremas que imitan la lógica humana para formular diagnósticos médicos, programar rutas, tomar decisiones financieras, configurar sistemas informáticos, analizar datos sísmicos para encontrar yacimientos de petróleo y otras muchas tareas.

Correctamente adiestrados, los robots desempeñarán un papel importantísimo. De hecho, estoy seguro de que nos van a sobrepasar en cualquier área imaginable del comportamiento, tanto intelectual como físico. Es inevitable que este desarrollo conduzca a una profunda reestructuración de nuestra sociedad. Habrá compañías enteras que existan sin empleados humanos ni inversores de ningún género. Los humanos tendrán un cometido esencial en la formulación del intrincado complejo de leyes que gobernará el comportamiento de las compañías. En último término, empero, es probable que nuestros descendientes dejen de trabajar del modo que ahora lo hacemos. Probablemente ocuparán su tiempo en diversas actividades sociales, recreativas y artísticas, no muy distintas de las que hoy llenan el ocio de jubilados o personas acomodadas.

La trayectoria expuesta recapitula toscamente la evolución de la inteligencia humana, pero a velocidad 10 millones de veces superior. Viene a sugerir que la inteligencia de un robot sobrepasará la nuestra antes ya del año 2050. Habrá entonces robots científicos, formados y educados, producidos en serie, que trabajarán de manera inteligente, económica, con rapidez y eficacia crecientes, lo cual garantizará que la mayoría de los conocimientos que la ciencia atesore en el 2050 habrán sido descubiertos por nuestra progenie artificial.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

VEHICLES: EXPERIMENTS IN SYNTHETIC PSYCHOLOGY. Valentino Braitenberg. MIT Press, 1984.

AI: THE TUMULTUOUS HISTORY OF THE SEARCH FOR ARTIFICIAL INTELLIGENCE. Daniel Crevier. Basic Books, 1993.

ROBOT: MERE MACHINE TO TRANSCENDENT MIND. Hans Moravec. Oxford University Press, 1999.

Historia Natural

Ars longa

HERBS AND HERBALISM IN THE MIDDLE AGES AND RENAISSANCE, por Jerry Stannard. Aldershot; Ashgate, 1999. **THE GREAT HERBAL OF LEONHART FUCHS *DE HISTORIA STIRPIUM COMMENTARII INSIGNES***. Edición preparada por Frederick G. Meyer, Emily Emmart Trueblood y John L. Heller. Stanford University Press; Stanford, 1999. **HISTORIA NATURAL DE CAYO PLINIO SEGUNDO**. Trasladada y anotada por el doctor Francisco Hernández (libros primero a vigésimoquinto) y por Jerónimo de Huerta (libros vigésimosexto a trigesimoséptimo) y Apéndice (libro séptimo, capítulo LV). Visor Libros; Madrid, 1999.

FRANCESCO REDI. UN PROTAGONISTA DELLA SCIENZA MODERNA. DOCUMENTI, ESPERIMENTI, IMMAGINI. Edición preparada por Walter Bernardi y Luigi Guerrini. Leo S. Olschki; Florencia, 1999. **CHRISTIAN GOTTLOB HEYNE'S CORRESPONDENCE WITH ALBRECHT AND GOTTLIEB EMMANUEL VON HALLER**. Edición preparada y comentarios de Frank William Peter Dougherty. Klatt; Göttingen, 1997. **JOHANN KASPAR LAVATER-CHARLES BONNET-JACOB BENNELLE BRIEFE 1768-1790**. Edición preparada y comentarios de Gisela Luginbühl-Weber. Peter Lang; Berna, 1997.

TADPOLES. THE BIOLOGY OF ANURAN LARVAE. Dirigido por Roy W. McDiarmid y Ronald Altig. The University of Chicago Press; Chicago, 1999. **RATTLESNAKE**, por Manny Rubio. Smithsonian Institution Press; Washington, 1998.

Con sobrada razón asociamos el comienzo de la ciencia renacentista al tratado copernicano *De revolutionibus orbium coelestium* y al vesaliano *De humani corporis fabrica*, ambos publicados en 1543. Pero sería infame olvidar que un año antes la botánica dio un vuelco con la aparición del *De historia plantarum*, de Leonhart Fuchs. En esa avenida de la investigación sentó cátedra Jerry Stannard, siempre sobrio, siempre insuperable. Nos quedaríamos a media luz si, para conocer la aventura de la historia natural, olvidáramos el estudio de *Herbs and Herbalism in the Middle Ages and Renaissance*.

Stannard, farmacéutico militar, enseñó historia medieval en la Universidad de Kansas y publicó un centenar largo de escritos. Creó su propio jardín botánico mediterráneo y, suelto en lenguas clásicas y modernas, buceó en mil manuscritos e incunables.

Sabido es que Aristóteles y Teofrasto fundaron la historia natural. Sus tratados, respectivamente, de animales y plantas fueron, en lo que a fundamento teórico se refiere, los mejores durante siglos. En su aplicación médica, las obras de Dioscórides, Plinio y Galeno ejercieron una influencia preponderante. Los libros *De materia medica* de Dioscórides mantuvieron una existencia precaria en Occidente hasta muy avanzada la Edad Media, no así en el Oriente bizantino. La enciclopédica *Historia naturalis* de Plinio fue, por contra, ampliamente leída, copiada y abreviada a lo largo del Medievo latino, sobre todo el herbario, que abarca los libros XX-XXV. Inspirado, quizás, en Dioscórides y Plinio, Apuleius Barbarus confeccionó otro herbario muy socorrido, si bien contenía sólo los nombres de las plantas, algunos sinónimos, las enfermedades con los simples indicados y el método de aplicación.

Directa o indirectamente, los herbarios medievales se fundaban en los autores clásicos. Pero la flora que éstos describían medraba en la cuenca mediterránea, en lugares semiáridos desconocidos por los europeos septentrionales. Si eso constituía fuente de confusión, la disolución del latín en lenguas romances aumentó la proclividad al error, pues no había un término de referencia establecido.

El herbario medieval se caracterizaba por la inclusión de plantas indígenas y exóticas (la pimienta, por ejemplo, introducida a través del comercio), la disposición alfabética, la identificación del nombre vulgar con el nombre científico y la descripción de la planta para salir al paso de sustituciones fraudulentas. En paralelo con los herbarios, los medievales manejaban recetarios, que exigían del lector cierta preparación, pues daban por supuesta la familiaridad con el mundo vegetal. A esas fuentes de información hemos de sumar tratados prácticos sobre tintes, alimentación y plagas.

Aunque muy alejada de los parámetros científicos actuales, la aplicación medieval de la materia médica no dependía de un empirismo aleatorio. Se guiaba por la doctrina de las signaturas, de acuerdo con la cual la figura de la planta o de alguna parte destacada de la misma evidenciaba ya, por similaridad con el órgano afectado, su capacidad sanadora. Pero los medievales fundaban también en otros criterios teóricos su administración de los "simples" o fármacos: la doctrina galénica de los cuatro humores, el equilibrio de los excesos, las palabras mágicas, la numerología o magia "aritmética" (aumento algebraico de las dosis con los días) y la astrología.

Quien se adentre en la historia natural antigua y medieval se dará cuenta en seguida de la imposibilidad, en infinitas ocasiones, de acotar la especie de que se está hablando. Nos hemos de conformar con sospechar la familia o el género, como mucho. ¿Qué planta es la "moly" de la que, según Homero, se extraía una droga mágica? Si seguimos a Teofrasto sería *Allium* sp. También según Dioscórides en un caso; en otro designaría una especie distinta, *Peganum harmala*. Plinio agrega a esas dos posibilidades, una tercera: *Withania somnifera* Dunn. Con el tiempo, los escritos que reflejen una flora mediterránea se irán inclinando por emparejar esa planta de poderes extraordinarios con *Withania somnifera* o *Peganum harmala*. A diferencia de moly, la identificación de la cebolla marina, *Urginea maritima*, recetada contra la hidropesía, mal común en la Edad Media, apenas entraña dificultad.

La botánica médica sufrió una profunda transformación en el Renacimiento alemán e italiano. La vuelta a Hipócrates era también una vuelta a Dioscórides. Las nuevas tendencias tendrán en la imprenta, recién inventada, su mejor aliado. En 1484, Peter Schöffer, asociado a Gutenberg

y sucesor suyo, imprimió en Maguncia el *Herbarius in Latino*, con toscas ilustraciones de unas 150 plantas y texto inspirado en fuentes medievales. Al año siguiente, Schöffer publicó el *Herbarius zu Teutsch* (*Gart der Gesundheit*), que se apoya en autores clásicos y medievales, árabes incluidos; incorpora 379 grabados. En Maguncia aparece también, en 1491, un *Hortus sanitatis*, medievalizante y dependiente del anterior.

Prosiguen esa labor los que Kurt Sprengel llamó en 1817 "padres alemanes de la botánica". El primero, Otto Brunfels. Para los grabados del primer volumen de sus *Herbarum vivae eicones*, tomados del natural, contó con la ayuda de Hans Weiditz, perteneciente al círculo de Albrecht Dürer. No se trabajó tanto el texto, preocupación principal de Jerome Bock y su *New Kreüter Buch,* que instaura la flora alemana. Detalla éste si las plantas son anuales o perennes, su época de floración, de fructificación y preparación de los simples; introduce la palabra *pistilo* en sentido botánico.

Leonhart Fuchs (1501-1566), el tercero de la progenie botánica tudesca, sobrepasa a cuantos le preceden e influye poderosamente en el curso de la medicina y la botánica posteriores. Fuchs paga tributo de reconocimiento a precursores y coetáneos, en particular, a Hermolao Barbaro, Marcello Virgilio y Jean Ruel, traductores de Dioscórides; también a Luca Ghini, maestro de la botánica italiana y de quien el germano recibió plantas y dibujos. Su obra magna, *De historia stirpium commentarii insignes*, publicada en 1542, acaba de aparecer con el antetítulo *The Great Herbal of Leonhart Fuchs*. Obra magna también, dividida en dos partes (estudio exhaustivo y facsímil), financiada por la Unidad Potomac de la Sociedad Herborista de América en Washington, y en la que intervino parcialmente Stannard. La continuación de la *Historia*, un extenso herbario en tres volúmenes conocido por *Codex Vindobonensis*, no ha visto todavía la luz.



Leonhart Fuchs a los veinticuatro años. Autor desconocido

Tras una sólida formación humanística en lenguas clásicas y filosofía natural, Fuchs estudió medicina en la Universidad de Ingolstadt, donde conoció a Philipp Melanchton que le ganó para la causa de la Reforma y le facilitaría, andando el tiempo, la cátedra de Tübingen. Con breves intervalos de ejercicio de la profesión, se dedicó a la enseñanza y al estudio. La *materia medica* que Fuchs mostraba en clase era extractos de raíces, hojas y frutos vegetales; agrupaba las preparaciones en astringentes, purgantes, reforzantes, sudoríficas o carminativas. Se opuso vehemente a la medicina astrológica y musulmana. En su enseñanza de la anatomía, se ganó la admiración de Vesalio, pese a pretender armonizar las enseñanzas de éste con las de Galeno.

Aunque Fuchs se prodigó en escritos médicos, que en muchas ocasiones levantaron polémica, la *Historia* labró su fama. Reunió 511 grabados e ideó para el libro un plan nuevo de organización. Las figuras, copiadas de la naturaleza, hacen sombra al texto, original en muchas descripciones, trasunto otras de Bock o Dioscórides. La *Historia* es una mezcla de información botánica y medicamentosa. Las plantas se ordenan por capítulos de acuerdo con el nombre griego. Pese a tan curioso criterio, agrupa con sentido botánico algunos especímenes, por ejemplo, a propósito de *Ranunculus*, *Mentha* o *Brassica*.

Estructura cada capítulo en apartados homogéneos bajo los mismos epígrafes. Bajo el epígrafe "Nomina" aporta la etimología y la sinonimia, que extrae de las autoridades habituales, así como los nombres usados en las farmacias. El apartado "Genera" abarca las especies conocidas (no en sentido linneano) con su denominación latina y alemana, más una breve descripción. Descripción que corresponde con mayor propiedad al epígrafe "Forma", reflejo de la imagen, mucho más explicativa. Aunque bebe

Literatura y Ciencia

NERVES AND NARRATIVES. A CULTURAL HISTORY OF HYSTERIA IN 19TH-CENTURY BRITISH PROSE, por Peter Melville Logan. University of California Press; Berkeley, 1997.

Peter Melville Logan enseña lengua y literatura en la Universidad de Alabama, donde dirigió en 1994 un seminario sobre "La histeria y la novela", algunos de cuyos materiales han servido de base a la presente monografía.

Tal y como señala Roy Porter en el prólogo, Logan atribuye al cuerpo humano un discurso escolar que establece conexiones con el cuerpo del texto literario que protagoniza. Parte de la tendencia a contar la historia de sus dolencias que caracterizaba a la clase media británica de principios del XIX, en especial las de tipo nervioso: histeria, hipocondría, melancolía, etc. y analiza un hecho asumido por la medicina de la época, que el sistema nervioso tiene una narración inscrita en sus fibras nerviosas, llegándose así al "cuerpo que tiene una historia que contar".

Las mencionadas alteraciones nerviosas, antes exclusivas de los miembros de la aristocracia inglesa, pasan a convertirse en una epidemia de la clase media. La clase trabajadora fue considerada inmune a estas enfermedades, propias de la riqueza. La unión que se establece entre el "cuerpo nervioso" y la condición social propició el que

en abundancia de Dioscórides, son exclusivas suyas las descripciones de plantas del Nuevo Mundo: *Phaseolus vulgaris*, *Zea mays*, *Cucurbita pepo, Tagetes patula y Capsicum annuum*. De los herbolarios aprehende la información para el epígrafe "Locus", el lugar donde crece el vegetal. El "Tempus" indica la estación de floración y fructificación. En la sección "Temperamentum" (disposición) remite a la composición de acuerdo con la teoría de los cuatro elementos. Complétanse sus detalles con los suministrados en el apartado "Vires", es decir, con las propiedades terapéuticas de la planta.

Mediado el siglo XVI, Europa había tomado ya partido por Dioscórides. España seguía acantonada en una corriente pliniana fortísima, que culminó en la *Historia Natural de Cayo Plinio Segundo*, traducida y anotada por Francisco Hernández. Nacido hacia 1515 en Puebla de Montalbán, Hernández estudió medicina en Alcalá. Herboriza y ejerce la medicina doquiera se instala: Torrijos, Sevilla (recorre la campiña cordobesa y otras zonas de Andalucía con el botánico y cirujano Juan Fragoso), Guadalupe (su compañero de salidas es aquí Francisco Micó, médico cuyo nombre se reconoce en el famoso herbario de Jacques Dalechamp), Toledo, donde comienza la traslación de Plinio, y Nueva España, donde la termina. Felipe II le había destinado a las Indias con el cargo de protomédico general y una misión épica: "hacer la historia de las cosas naturales... durante el tiempo de cinco años que en ellos se va a ocupar". Es de dominio público la infausta suerte que corrió el resultado de su meritísima labor, cuyos ecos llegan al trabajo paralelo en torno a Plinio.

El volumen de la reseña corresponde a los tomos IV, VI y VII de las *Obras Completas* de Hernández, publicadas por la Universidad Nacional Autónoma de México en 1976. En el prólogo Germán Somolinos traza el estudio y glosa de Plinio en la Universidad de Alcalá y en la de Salamanca, a través de Antonio de Nebrija, Juan Ramírez de Toledo, Hernán Núñez y Francisco López de Villalobos, más una leve extensión al Estudio General levantino en la figura de Juan Andrés Strany. Hernández se funda en los comentarios del Pinciano (Núñez) y dos códices medievales, mientras mantiene abierta sobre la mesa la criba depuradora de los humanistas transalpinos.

A la traducción, en un español riquísimo parejo al *Dioscórides* de Andrés Laguna, agrega su propio comentario, bajo el epígrafe "El Intérprete". Así, a propósito de *Quercus*: "La vellota del roble vulgar, cuya mata llamamos rebollo, como carrasco la de la enzina y coscoja la de la ílex...". Refleja su espíritu crítico ante la confusión reinante acerca del verdadero paliuro: "Son tan diversas las descripciones que deste árbol en los autores se hallan, que me persuado haverse llamado diversas plantas en diversas regiones paliuros. A lo menos es cosa tan perplexa que, entre todos los pareceres, tenía al presente por el mejor no dar ninguno." Y da muestra del conocimiento de la flora nacional cuando se ocupa de los pinos según el de Como: "Conocemos en Hespaña casi todas estas seis especies de pinos y tienen nombres vulgares entre nosotros, porque al que llaman los latinos *pinus*, dezimos en Hespaña pino alvar; al que *pinaster*, pin donzel; al *abies*, pinavete; a la *picea*, pin integral; al *larix*, pin carrasco... y a la *teda*, tea." Para completar la obra inacabada e inédita de Hernández, se ha recurrido a la traducción de Gerónimo de la Huerta, realizada entre finales del XVI y primer tercio de la centuria siguiente.

La historia natural opera otra transformación decisiva cuando dirige su ya experta mirada hacia los fenómenos de la reproducción, sello distintivo de la "Scienza moderna", objeto de análisis en *Francesco Redi*. Protomédico de los Medici, entre 1666 y 1697, aprovechó las oportunidades que le ofrecía la corte para establecer su propio laboratorio, su "teatro de experimentos". Para sus disecciones anatómicas, disponía de animales abatidos en las cacerías toscanas, peces traídos por los pescadores de Livorno e incluso animales exóticos que vivían en el serrallo del jardín de Boboli. Podía contar con las instalaciones y el personal de la "Especiaría ducal" para sus inquisiciones toxicológicas, que demandaban un suministro incesante de serpientes y escorpiones. A sus órdenes estaban pintores y grabadores para dibujar cualquier curiosidad naturalista que le pasara por las manos, o se comportara de un modo curioso bajo la lupa del microscopio.

Sacó partido de la experiencia en plantas y animales de los iletrados, él, que se ufanaba de ser "en las cosas naturales el más incrédulo del mundo" y atenerse sólo a lo que "había observado con los propios ojos". No ha pasado inadvertido el "experimentum crucis" recogido en las *Osservazioni intorno alle vipere*. Se discutía dónde guardaban las víboras el veneno. Una cuestión menos bizantina de lo que parece a primera vista, si recordamos que la carne del reptil entraba en la preparación de la triaca. Se decidió someter a prueba la hipótesis de una pléyade de médicos y filósofos que lo ubicaba en la hiel. Redi mandó traer a un tal Jacopo apodado el "Viperaio" por su avezada ardid en cazar víboras. Viperaio tomó hiel de

algunos escritores explicaran en sus novelas las enfermedades nerviosas como producto de un orden social malsano. Es el caso de William Godwin, Mary Hays, Maria Edgeworth y de la obra de Thomas de Quincey, *Confesiones de un inglés fumador de opio*, estudiadas en la segunda parte del libro. Los dos primeros autores, radicales, utilizaron la inestabilidad de la forma narrativa nerviosa para hacer referencia a conflictos no resueltos en el orden social. Los otros dos, conservadores, describieron diferentes maneras de apartarse de una condición nerviosa que suponía una pesada carga.

En la época victoriana, estudiada en la tercera parte, se produjo un peculiar acercamiento a la "condición nerviosa" del ser humano. La nueva clase trabajadora urbana heredó el problema de un determinismo medioambiental excesivo. A ello se unió un cambio en la conceptualización médica del sistema nervioso y ambos aspectos se reflejan en una novela paradigmática de la época, *Middlemarchs*, de George Eliot.

La característica que define al "cuerpo nervioso" es su susceptibilidad ante las alteraciones. No obstante, aunque todo cuerpo tiene nervios, no todos éstos pueden alterarse. El modo en que esto sucede en términos de clase y género constituye el núcleo de este trabajo. Logan defiende que el "cuerpo nervioso" es parte integral de la cultura en que vivían los autores literarios de finales de la época georgiana y del período victoriano.

M.ª José Báguena Cervellera



Diorama ecológico de una comunidad hipotética de renacuajos que viven en remansos de agua neotropicales. Se ilustran renacuajos de seis especies diferentes con distinto morfotipo mientras nadan, comen, se esconden, etcétera

víbora, y atemperándola con medio vaso de agua fresca, se lo tragó.

Si erró de plano al atribuir la formación de insectos en las agallas a una presunta "anima sensitiva" de las plantas, en vez de pensar en los huevos allí diseminados, acertó en sus innúmeras observaciones del microcosmos que bullía bajo sus lentes de aumento. Acertó también en su ataque frontal contra la teoría de la generación espontánea en las *Esperienze intorno alla generazione degli insetti*, con la descripción minuciosa de los ensayos en los que empleó recipientes abiertos y cerrados que contenían las sustancias orgánicas más diversas, dejadas allí hasta la putrefacción.

Esconden sus manuscritos una valiosa zoología por descubrir. Así el dibujo fiel y la explicación justa del aparato gastrointestinal del lenguado, del que afirma que "carece de vejiga natatoria o al menos yo no he sabido verla". (En este pez, igual que en otros muchos adaptados a la vida de las profundidades, la vejiga natatoria aparece sólo en las fases larvarias y postlarvarias, para ir luego reduciéndose.)

A la generación de los organismos se consagraron también con particular empeño los naturalistas del siglo XVIII. Sobresalieron dos, que ahora conocemos mejor gracias a la publicación de parte de su epistolario: *Christian Gottlob Heyne's Correspondence with Albrecht and Gottlieb Emmanuel von Haller* y *Johann Kaspar Lavater-Charles Bonnet-Jacob Bennelle Briefe*.

De Albrecht von Haller se conservan unas 12.000 cartas. Han ido editándose las cruzadas con Bonnet, Auguste Tissot, Horace-Bénédict de Saussure, Giovanni Battista Morgagni, Ignazio Somis y Marc Antonio Caldani. Profesor de fisiología, anatomía y botánica desde 1736 en Göttingen, Haller es, a partir 1751, el primer presidente de la Sociedad Real de Ciencias allí establecida, y de la que Heyne es secretario. La correspondencia versa no sólo sobre asuntos administrativos de la entidad, sino también sobre trasiego de libros, noticias sobre plantas y otros.

Haller estudió medicina, matemática e historia natural. En oposición al *botanicus sedentarius*, su bestia negra, recorrió palmo a palmo los Alpes hasta reunir su inmensa flora helvética. Buscaba orden y sistema en anatomía e histología; en lo que llamó *tela cellulosa* fundaba la constitución de tendones, cartílago, ligamentos y órganos. Con su teoría de la irritabilidad, o contractilidad de las fibras musculares, impulsó el desarrollo de la neurofisiología.

En sus ensayos fisiológicos de 1747 dudaba todavía de la intervención directa de los espermatozoides en la generación. "Nunca se ha visto un feto en el óvulo de una virgen, ni en el ovario." Aceptaba, pues, la epigénesis, que justificaba mediante una fuerza de atracción que iba congregando partículas de un fluido viscoso para formar fibras, membranas, vasos,

músculos y huesos. La epigénesis se hacía visible en la embriogénesis del corazón del pollo, en la regeneración de los pólipos y en las plantas. Cuatro años después juzga la preexistencia con mejores ojos.

Durante su investigación recibió constante apoyo de Charles Bonnet, cuyo descubrimiento de la partenogénesis de los áfidos y cuyas observaciones microscópicas de la *imago* del áfido, por debajo de la piel de la pupa, le avalaron para abanderar el preformacionismo. Bonnet creía que Dios había creado originariamente una plétora de gérmenes, en cada uno de los cuales estaría encapsulado un organismo en miniatura que, a su vez, portaría gérmenes que contendrían otros homúnculos y sus gérmenes.

El epistolario entre este naturalista y Johann Kaspar Lavater, mediado por Jacob Bennelle, gira en torno la traducción que el teólogo protestante emprende de la *Palingenésie Philosophique ou Idées sur l'Etat passé et l'Etat Futur des Etres Vivans. Ouvrage destiné à servir de Supplement aux derniers Ecrits de l'Auteur et qui contient principalement le Précis de ses Recherches sur le Christianisme*, de Bonnet (1769).

Al hilo del trabajo de Lavater perfila su pensamiento. "Los animálculos de las infusiones pueden, igual que los pólipos, multiplicarse por una división o subdivisión continuas. Los animales de forma redonda u oval se dividen transversalmente. Se forma en medio de su longitud un estrechamiento paulatino hasta que las dos partes sólo quedan unidas por un hilo. Entonces el animal, o mejor, los dos animales, realizan grandes esfuerzos para culminar la división. En los primeros momentos de su nueva vida son más pequeños que el animal del que resultan, pues cada uno sólo tiene la mitad del todo. Needham me ha hecho el honor de hablar elogiosamente de estas observaciones en sus Notas sobre la traducción de la obra de Spallanzani, y se sirve de ellas para apoyar su sistema."

Ese apego a la observación directa no le impide remontar vuelo filosófico. Escribe a Lavater: "Son los hechos bien observados, bien comprobados, bien analizados los que deben servir de base para nuestros razonamientos en ciencias naturales. Pero el arte de observar no está muy extendido, ni tampoco el de razonar... La experiencia demuestra que la privación de un sentido entraña la privación de todas las ideas que dependen del ejercicio de ese sentido: la privación absoluta de todos los sentidos comportaría, pues, una privación total de ideas."



Crotalus lepidus klauberi

En nuestros días, el trabajo en historia natural abarca desde la investigación de punta, que hemos ejemplificado en *Tadpoles. The Biology of Anuran Larvae*, hasta los pliegos fotográficos, cosidos en *Rattlesnake*. Vertebrados ambos de amplia difusión. Hay renacuajos en los arroyos alpinos de 3000 metros de altura y en las charcas de las selvas tropicales. Encontramos crótalos desde Canadá hasta Argentina central, desde los humedales hasta desiertos, a nivel del mar y en las cumbres.

Pero ocupe el nicho que ocupe y viva donde viva, el renacuajo siempre es un renacuajo, dotado de una morfología corporal aplanada, ojos dorsales, espiráculo sinistro, con aletas, branquias externas e internas, papilas marginales y 2/3 hileras dentarias. Posee condrocráneo, una caja cartilaginosa que protege al cerebro y presta apoyo a los órganos de los sentidos y al aparato mandibular. Las mandíbulas presentan cartílagos suprarrostrales y cartílagos infrarrostrales que confieren soporte a las láminas queratinizadas superior e inferior.

Las larvas de los anuros, incapaces de reproducirse, constituyen un estadio muy especializado, no una simple fase embrionaria que termine con la metamorfosis. Su cuerpo sufre una remodelación (páncreas exocrino y tracto alimentario posterior), experimenta una degeneración durante la metamorfosis (órganos hematopoyéticos, aparato filtrador, sistema linfáticos, pronefros), permanece quiescente (partes de los sistemas excretor y reproductor) o persiste activo durante la fasa larvaria y adulta del ciclo biológico (hígado, pulmones, bazo, timo y sistema vascular).

Con el cascabeleo inquietante de la cola y el veneno en la boca, los crótalos infunden un pavor paralizante, hecho de miedos atávicos. Reparo que se entiende conocidas su anatomía y pautas de camuflaje. En ellas se explayan fotografías y comentarios, que describen también el medio, ciclos biológicos, mudas y estrategias de alimentación de estos reptiles.

Comprenden los géneros *Sistrurus* y *Crotalus*, que se distinguen por el tamaño de las escamas en la región cefálica; las de *Crotalus* son pequeñas y regulares, en tanto que *Sistrurus* desarrolla un grupo irregular de escamas grandes. Se conocen 29 especies de *Crotalus*, que parecen cruzarse sin especial dificultad, por sólo tres de *Sistrurus*.

El color y el dibujo de su piel dependen de células pigmentarias: los melanóforos sintetizan pigmentos negros y pardos; los xantóforos, rojos y amarillos. Los iridóforos contienen gránulos reflectores de ondas térmicas y luminosas. Contribuyen a la producción del color mediante la reflexión de la luz y exhiben una gama sutil de estaños, grises, azules y verdes.

LUIS ALONSO

Ian Stewart

¡Defended el Imperio Romano!

Durante la Segunda Guerra Mundial, siendo el general Douglas MacArthur jefe supremo de las operaciones militares en el Pacífico, adoptó la estrategia de “saltar de isla en isla”, que consistía en ir trasladando tropas de una isla a otra cercana, pero sólo cuando podía dejar la primera bien guarnecida. En el siglo IV d. C., el emperador Constantino había de afrontar un problema parecido para el despliegue de sus tropas, aunque esta vez se trataba de mantener la seguridad de un imperio. La solución elegida por Constantino parece haber sido la primera aplicación documentada de la estrategia que muchos siglos después adoptó MacArthur en el Pacífico.

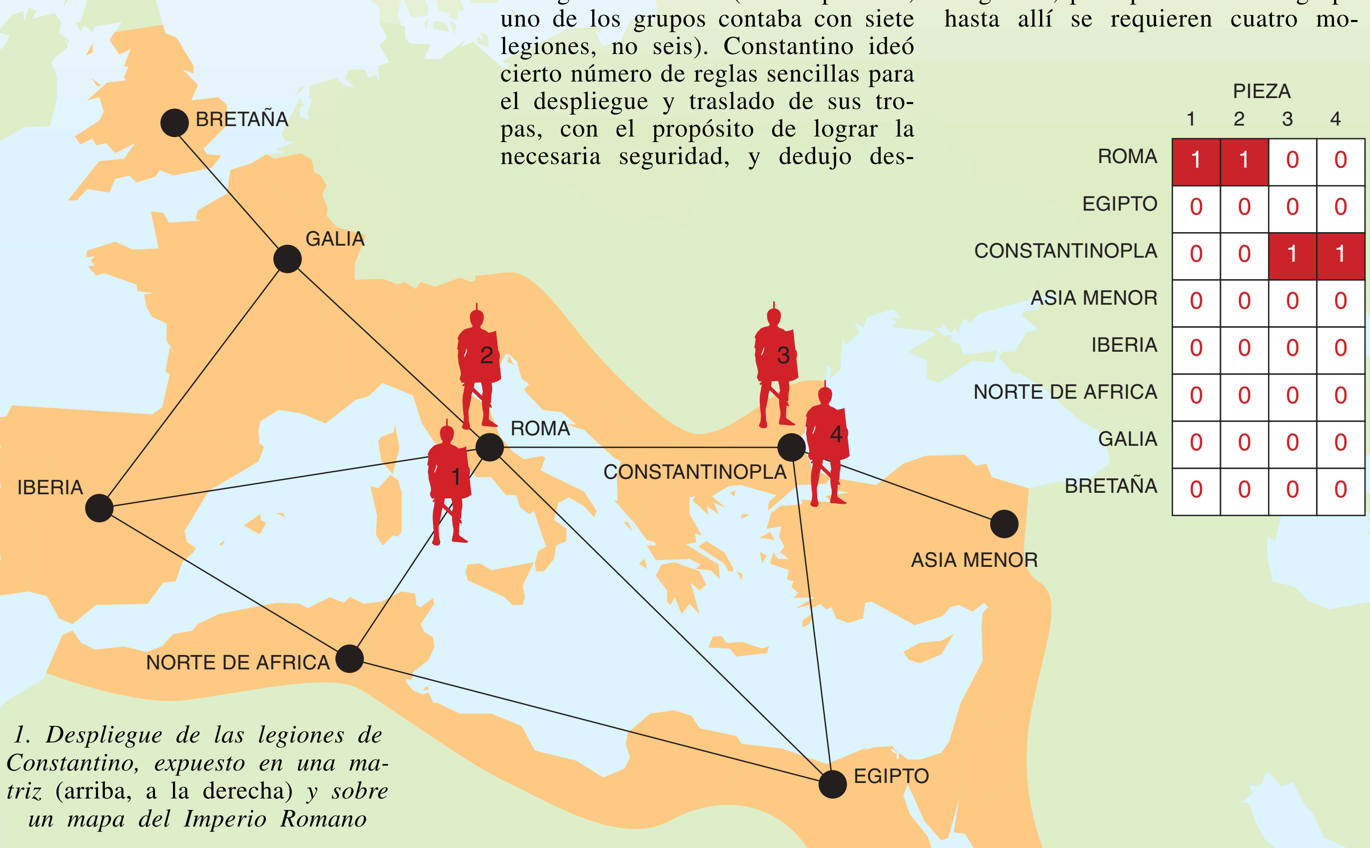
¿Podría, empero, haber desplegado Constantino sus legiones con mayor eficacia? En 1997, Charles S. ReVelle y Kenneth E. Rosing aplicaron la técnica de programación cero-uno para estudiar el problema de Constantino. Su trabajo constituye un ejemplo hermoso de aplicación de esta técnica, y sirve de fundamento a un entretenido juego. Problemas de esta naturaleza, aunque mucho más complejos, suelen plantearse al adoptar decisiones comerciales o militares.

Como ejercicio de “precalentamiento”, tomemos una versión simplificada del Imperio Romano en tiempos de Constantino. En este “juego de tablero” vemos ocho regiones (círculos) que van desde Asia Menor hasta Bretaña, junto con las rutas (líneas) que enlazan las regiones. En el siglo iii, las fuerzas del imperio dominaban la mayor parte de Europa, y las fuerzas armadas disponibles sumaban 50 legiones. En el siglo iv, sin embargo, tal número se había reducido a la mitad, o sea, a 25 legiones. Constantino las organizó en cuatro grupos, integrado cada uno por seis legiones, y dejó en reserva la legión sobrante (en la práctica, uno de los grupos contaba con siete legiones, no seis). Constantino ideó cierto número de reglas sencillas para el despliegue y traslado de sus tropas, con el propósito de lograr la necesaria seguridad, y dedujo después las consecuencias lógicas de tales reglas.

Imaginemos que cada grupo de seis legiones constituye una única pieza, que ha de ser colocada en los círculos señalados en el tablero de juego. He aquí las reglas de Constantino:

- Una región queda asegurada si es posible trasladar una pieza hasta ella en un solo paso desde una región adyacente.
- Antes de poder retirar una pieza de una región es necesario que la región esté ocupada cuando menos por dos piezas (al menos una pieza ha de quedar en reserva).

¿Cómo asignar entonces los grupos para mantener seguro todo el imperio o, en su defecto, tan gran parte de él como sea posible? Para solucionarlo, Constantino emplazó dos grupos en Roma y dos en Constantinopla, su recién fundada capital. Con tal despliegue, Bretaña no puede quedar asegurada, pues para llevar un grupo hasta allí se requieren cuatro mo-



	PIEZA 1	2	3	4
ROMA	1	1	0	0
EGIPTO	0	0	0	0
CONSTANTINOPLA	0	0	1	1
ASIA MENOR	0	0	0	0
IBERIA	0	0	0	0
NORTE DE AFRICA	0	0	0	0
GALIA	0	0	0	0
BRETAÑA	0	0	0	0

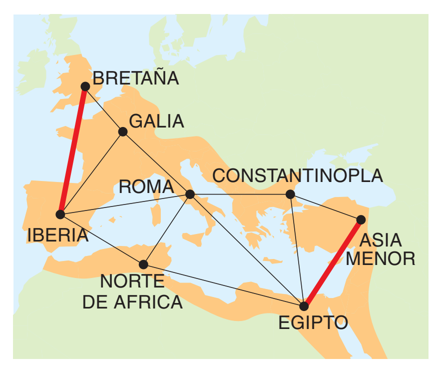
1. Despliegue de las legiones de Constantino, expuesto en una matriz (arriba, a la derecha) *y sobre un mapa del Imperio Romano*

vimientos. He aquí una forma de hacerlo: Primero se traslada una pieza desde Roma hasta Galia (asegurando las Galias, que sin duda habrían sido para los romanos mucho más importantes que la remota y húmeda Bretaña). Se lleva después una pieza de Constantinopla a Roma, luego a Galia y, por último, a Bretaña.

¿Sería posible mejorar el despliegue de Constantino? Sí, en el sentido de que existe un despliegue con el cual cada región puede quedar asegurada en sólo un movimiento. Basta situar dos piezas en Roma, una en Bretaña y una en Asia Menor. ¿Por qué no lo hizo así Constantino? Después de todo, Roma recibiría protección suficiente: 12 legiones, lo mismo que con la solución del emperador. Parece probable que Constantino no quisiera un despliegue tal, porque dejaría al imperio inerme en el caso de conflictos simultáneos en dos frentes. En cuanto una pieza salga de Roma, todas quedan inmovilizadas en su lugar, imposibilitadas para un segundo movimiento.

Podemos ver una variante del problema en la figura 2, que tiene dos rutas más: una entre Bretaña e Iberia, y otra entre Egipto y Asia Menor. En este caso, nuestra solución mejorada —dos piezas en Roma, una en Bretaña y una en Asia Menor— todavía garantiza la seguridad del imperio en un solo movimiento. Pero ahora existen nuevas conexiones que permiten más movimientos de las tropas; cabe preguntarse si existirán otras soluciones.

Antes de responder a esta pregunta me detendré en las matemáticas aplicables a problemas más complejos de su misma naturaleza. El campo general es conocido por programación,



2. Una variante más compleja del problema de Constantino, que cuenta ahora con nuevas rutas entre regiones (en rojo)

y entraña la representación en forma algebraica de todos los problemas de este tipo. Una metodología consiste en preparar una matriz cuyas filas y columnas corresponden, respectivamente, a regiones y piezas. La matriz del problema de Constantino tiene ocho filas y cuatro columnas. Para denotar que una pieza se encuentra en una región, pondremos un 1 en la fila y columna correspondientes, y expresaremos con 0 que no se encuentra en ninguna otra región. En la figura 1 se encuentra la matriz correspondiente a la solución de Constantino. Sus normas pueden ser formuladas como reglas de modificación de los elementos de tales matrices, confiriéndoles así carácter algebraico. Por razones evidentes, este tipo de cuestiones son conocidas por problemas de programación cero-uno.

El método de ReVelle y Rosing descompone el problema en otros dos. El primero es el problema de despliegue de cobertura. En él se deja de lado la restricción de que hay cuatro piezas; se pide, en cambio, el número mínimo de piezas que debidamente situadas permitan proteger el territorio en un solo movimiento. (Si la respuesta es mayor que cuatro, el problema de Constantino no tiene solución.) El segundo, complementario del anterior, se denomina problema de despliegue de cobertura maximal. Se pide ahora el número máximo de regiones que pueden ser protegidas con cuatro piezas efectuando a lo sumo un desplazamiento.

ReVelle y Rosing han inventado métodos generales, plasmados en programas informáticos, para resolver ambos problemas. Los dos métodos, en conjunción, analizan el problema de Constantino, y nos dicen si existe una solución con cuatro piezas (que sí la hay) y si se podría reducir el número de piezas (no). Tales métodos permiten resolver cualquier problema de despliegue de recursos similar.

Seis son las soluciones al problema de Constantino. Los números entre paréntesis dicen cuántas piezas situar en las regiones mencionadas:

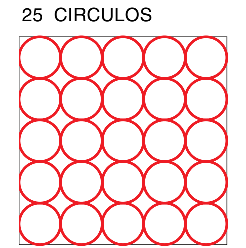
1. Iberia (2), Egipto (2).
2. Iberia (2), Constantinopla (2).
3. Iberia (2), Asia Menor (2).
4. Bretaña (2), Asia Menor (2).
5. Bretaña (1), Roma (2), Asia Menor (1).
6. Galia (2), Egipto (2).

Los sucesores de Constantino perdieron el control de Bretaña. Las causas fueron seguramente más complejas de lo explicable mediante este sencillo modelo. Pero si Constantino hubiera sido un matemático más competente, quizás el Imperio Romano hubiera durado un poco más.

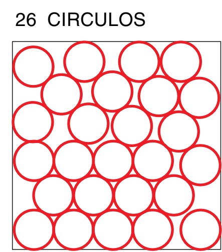
Acuse de recibo

En "Enlatado de sardinas redondas" [abril de 1998] examiné la forma de empaquetar el máximo número posible de círculos en recipientes cuadrados, circulares y triangulares. Desde aquella fecha, Kari J. Nurmela me ha enviado cuatro trabajos de investigación sobre el problema (dos de ellos, en colaboración con Patric J. Östergård). Uno de los artículos da demostraciones asistidas por ordenador de los empaquetamientos óptimos de hasta 27 círculos (presento aquí tres de ellos). En otro de los artículos se analiza un problema sutilmente diferente: la distribución de cargas eléctricas puntuales en un disco circular, de modo que la energía total sea mínima. Dado que las cargas se repelen mutuamente, tienden a situarse en anillos concéntricos (*arriba*). Los lectores pueden dirigirse a Kari.Nurmela@hut.fi en solicitud de más detalles. *—I. S.*

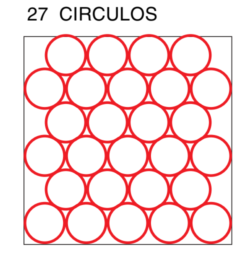
25 CIRCULOS



26 CIRCULOS



27 CIRCULOS



Nexos

James Burke

A vueltas con el ozono

Hace pocos meses estaba en la playa (me puse sombrero y crema protectora, por supuesto), aspirando el aroma marino y pensando (como suelo hacer) en Christian Schönbein, que descubrió el ozono (así se llamaba al efluvio) en 1839 cuando estaba enredando con electricidad y agua. Seis años más tarde iba a impresionar mucho más a todo el mundo con su otro descubrimiento. Al que llegó empapando un lienzo de lana en una mezcla humeante de ácidos nítrico y sulfúrico, escurriéndolo, lavándolo y secándolo. El resultado espectacular de ello era que, cuando se prendía, el género estallaba con más vigor que la pólvora. Schönbein llamó a la sustancia "algodón pólvora", y a pesar del inmediato interés expresado por todos los gabinetes militares que pudieron oírlo, no llegó al mercado hasta pasado más de un decenio. Motivo: la primera vez que se intentó producirlo en grandes cantidades, el algodón estalló y arrasó por completo la fábrica (y produjo serios daños en la ciudad inglesa de Faversham, a un par de kilómetros).

En 1867 la funesta gasa de Schönbein estaba destinada a reaparecer como resultado del Gran Temor por la Escasez del Elefante, cuando el *New York Times* predijo la extinción casi inevitable, de continuar los cazadores cobrándose piezas con su afán característico. Los jugadores de billar se enfrentaban a un lúgubre futuro, porque las mejores bolas se obtenían con el meollo del despojo de un colmillo perfecto. Para ello se necesitaba un copioso abastecimiento de elefantes muertos. Vaya, vaya. Que era el motivo por el que la firma Phelan & Collander ofrecía 10.000 dólares por un sustituto del marfil, excitando así la imaginación de John Hyatt, un joven impresor de Albany (Nueva York). En 1870 Hyatt mezcló algodón pólvora con alcohol y alcanfor, y se llevó el gato al agua (pues no está aceptada la expresión "llevarse los billares al agua"). El maravilloso material que produjo se destinó a dientes postizos, puños y cuellos duros, floreros, peines, plumas, fichas de dominó y mil cosas más. Estoy seguro de que ya han adivinado que acabaría por emplearse en las cámaras de fotos; en 1889 un ex banquero llamado Eastman patentó una película fotográfica hecha de "celuloide" (como llamaba el hermano de Hyatt al falso marfil).

Aquí se complica la trama. Antes, en 1877, un estrafalario que se hacía llamar Eadweard Muybridge (nombre real: Ed Muggeridge) había obtenido unas instantáneas de un caballo al galope. Estas primeras escenas de acción acabaron en manos de un fisiólogo de París, Etienne Jules Marey, que estaba interesado en la forma de moverse de cualquier cosa que se moviera. En 1887 produjo su *fusil chronophotographique*, que empleaba un obturador para exponer un rollo de película de papel sensibilizada a 12 disparos por segundo. En 1889 Marey le mostró su artilugio a Edison, que sin pérdida de tiempo se mercó algo del nuevo celuloide de Eastman. Y en 1891 "inventó" la cámara de cine. O (más probablemente) la inventó uno de sus oficiales (trabajando conforme a la máxima del laboratorio de Edison: "Hay un sistema mejor. Encuéntralo").



Fue otro cacumen edisoniano quien por lo visto se encontró con una admirable bomba de alto vacío desarrollada unos años antes por un químico alemán, Hermann Sprengel. También le había llegado el soplo a un inventor británico, Joseph Swan, que estaba buscando la misma iluminación que Edison: una bombilla incandescente cuyo filamento de carbono no se quemara si se lograba un buen vacío dentro del bulbo. Empeño que, gracias al buenazo de Hermann, se iba a conseguir. Y antes de entrar en el debate de quién se levantó, si Edison o Swan, debo apuntar que otro tipo, en Cincinnati, había sugerido la incandescencia allá por 1845. De cualquier manera, en 1880 Swan instaló la primera de sus lámparas en la residencia de Sir William Armstrong, un politicastro local, un águila para las leyes, ingeniero hidráulico, diseñador de artillería de campaña, constructor de barcos y dedicado a los grandes negocios en general. La casa era una extravagancia construida sin reparar en gastos diseñada por el mismo Armstrong y edificada en un paraje de ornamentación delirante tal y como se esperaba de los magnates de la industria antes de las calificaciones parcelarias. Todo lo que le faltaba al lugar (algo en común con el resto del mundo salvo los laboratorios de Swan y Edison) era una bombilla eléctrica.

En 1843 había sido elegido miembro de la Real Sociedad con la ayuda de un tal Charles Wheatstone. Y otra vez la cuestión de la primacía. Junto con un fulano llamado Cooke, Wheatstone era el socio que inventó el telégrafo en 1837, mucho antes que Morse (al igual que habían hecho como una docena de sujetos, de una manera u otra). El artefacto de Wheatstone funcionaba haciendo que la señal

recibida desviara dos agujas magnéticas que señalaban letras.

Como todos los victorianos, Wheatstone trabajó en muchas otras cosas además del electromagnetismo. Inventó una máquina de cifrado, una manera de obtener la posición del sol a partir de la polarización de sus rayos y el reostato. Pero su verdadera obsesión era la acústica. Cosa nada sorprendente para alguien nacido en el seno de una familia de fabricantes de instrumentos y que en 1829 había inventado la concertina.

Sin duda uno de los mejores bandoneones de todos los tiempos (según su familia) fue Lord Balfour, primer ministro británico desde 1902 y más tarde ministro de asuntos exteriores (de cuando data una carta a Rothschild en que manifestó la que se conocería como Declaración Balfour, dando el visto bueno oficial al plan para erigir el futuro estado de Israel). En 1921 Balfour llegó a presidente de la Sociedad para la Investigación Psíquica, juntándose con saboteadores del sistema como el profesor de física Oliver Lodge.

Antes de intentar la comunicación con los muertos, Lodge también contribuyó notablemente a mejorar la variante radiotelegráfica, cuando desarrolló (al igual que el francés Edouard Branly, y aquí retomamos el hilo) el "cohesor". Este dispositivo empleaba limaduras de metal para ayudar a detectar las ondas de radio, porque se apretujaban cuando una señal electromagnética, aunque fuera muy débil, las atravesaba. Marconi usó el cohesor para posibilitar la recepción en Terranova, en 1901, de su primera (y muy débil) ristra de puntos y rayas.

La cuestión de cómo se las habían arreglado estas señales para esquivar el abombamiento de la Tierra la explicó teóricamente, un año después del suceso, el sobrino de Wheatstone, Oliver Heaviside. Y, simultáneamente, el ingeniero eléctrico norteamericano Arthur Kennelly (¡esto se me está escapando de las manos!). Ambos postularon que las señales de radio podrían rebotar en alguna clase de capa estratosférica. En 1912 uno de los antiguos ayudantes de Marconi, un físico llamado William Eccles, que había participado en la preparación de la transmisión transatlántica inaugural, redondeó una teoría para demostrar que una capa de aire ionizado sería capaz de producir ese reflejo. En 1924 Edward Appleton demostraría que Eccles tenía razón con el descubrimiento de la ionosfera, causada por el efecto de los rayos X y ultravioletas del sol sobre la atmósfera.

En 1913, sólo un año después de que Eccles terminara lo suyo, el francés Charles Fabry estaba ya identificando *otra* cosa distinta, estratosférica y ionizada, causada por la radiación ultravioleta recibida. Era una capa de gas que protege eficazmente la vida sobre la Tierra de los efectos letales de dicha radiación. La protección es hoy un poco menos efectiva que en la época de Fabry, debido al agujero que tiene. Razón por la cual yo llevaba todas esas protecciones en la playa. Porque Fabry encontró allá arriba el mismo gas que Schönbein descubriera aquí abajo: ozono.

Ideas aplicadas

Louis A. Bloomfield

Filtros de agua

Pese a su nombre, el tipo más común de filtro de agua no produce agua químicamente pura. Si así fuera, el agua no nos sabría bien. El carbono activo y su resina de intercambio iónico del filtro eliminan del agua los iones y moléculas no deseados, dejando en ella los que le confieren un sabor agradable. Tal selectividad tiene un aspecto práctico y es que alarga la vida del filtro. La capacidad de éste respecto a los compuestos químicos está limitada por las leyes de la termodinámica. Conforme el agua se hace más pura y arreglada, el filtro se va tornando más impuro y desarreglado. Este desorden acumulado y el asociado agotamiento de la energía potencial del filtro rebajan su eficacia. Dejando en el agua compuestos inocuos y deseables, fluoruros por ejemplo, el filtro evita su muerte prematura.

EL CARBONO ACTIVO es una sustancia altamente porosa que actúa de esponja frente a las moléculas desechables como el benceno ( ) y ciertos pesticidas ( ) y aceites ( ). Tales moléculas se unen química y físicamente a la superficie que ofrece la gran red de poros grandes y pequeños del carbono. Un solo gramo de carbono activo puede albergar en su interior una superficie superior a los mil metros cuadrados (casi el tamaño de un campo de fútbol) por lo que sus poros pueden atrapar incontables moléculas antes de agotar el espacio. El carbono activo inicia una reacción química que transforma en cloruro ($^{-}$) y en hidrógeno ($^{+}$), iones éstos no peligrosos y de buen sabor, el cloro libre HOCl ( ) y OCl^{-} ( ) que las empresas abastecedoras de agua añaden a ésta para matar los gérmenes.

LA RESINA DE INTERCAMBIO IONICO, un plástico especialmente preparado, reemplaza con inocuos hidrogeniones los iones metálicos tóxicos tales como plomo ($^{++}$), cobre ($^{++}$), mercurio ($^{++}$) y cadmio ($^{++}$). También elimina los iones de calcio ($^{++}$) y magnesio ($^{++}$) en cantidades suficientes para que no se formen depósitos de agua dura en teteras y tazas de té, pero dejando algunos de esos iones para que no se estropee el gusto del agua.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



FLOTANDO EN EL ESPACIO, por I. Steve Smith Jr. y James A. Cutts
Los globos ofrecen un modo barato y de respuesta rápida para estudiar los confines superiores de la atmósfera terrestre y los de otros planetas.

UN ZEPELIN PARA EL SIGLO XXI, por Klaus G. Hagenlocher
Mediante el desarrollo de modelos aerodinámicos informáticos y empleando materiales modernos, la compañía que fabricó los zepelines los ha devuelto a los cielos europeos.

EL GLOBO QUE VOLO ALREDEDOR DEL MUNDO, por Phil Scott
Para construir un globo capaz de circunnavegar la Tierra, los ingenieros arrancaron una página de la historia aeronáutica.

EL SINO DE LA VIDA EN EL UNIVERSO, por Lawrence M. Krauss y Glenn D. Starkman
Hace miles de millones de años el universo, demasiado caliente, no podía albergar vida. Dentro de edades sin cuento, se volverá tan frío y vacuo que la vida, por muy inteligente que sea, perecerá.

ACUSTICA DE TIEMPO INVERTIDO, por Mathias Fink
Baterías de transductores recrean un sonido y lo devuelven a su fuente como si el tiempo se hubiese invertido. Se aplicarán a la destrucción de cálculos renales, detección de fallos en los materiales y comunicaciones con submarinos.

REINAS QUE CAPTURAN ESCLAVAS, por Howard Topoff
En determinados rincones del mundo de las hormigas la vida se desenvuelve entre invasiones, muertes y tomas de rehenes. La batalla real es un tipo de parasitismo social.

LA LUZ DE SINCROTRON, por Josep Campmany, Joan Borda y Ramón Pascual
Las fuentes de luz de sincrotrón constituyen un instrumento indispensable para determinadas investigaciones, lo mismo en ciencia básica que aplicada. España contará pronto con una instalación de ese tipo.

HIELO INFLAMABLE, por Erwin Suess, Gerhard Bohrmann, Jens Greinert y Erwin Lausch
Los cristales de hielo cargados de metano que se encuentran en el subsuelo marino acumulan más energía que el conjunto de todas las reservas de crudo del mundo. Pero estos depósitos de metano son muy frágiles y el gas que se escapa de ellos podría acentuar el calentamiento global de la atmósfera.

LA VISION, VENTANA A LA CONSCIENCIA, por Nikos K. Logothetis
La exploración de la mente humana se centra en la percepción visual: la interpretación de lo que vemos.

EL BANCO GRAMEEN, por Muhammad Yunus
Un experimento a pequeña escala iniciado en Bangladesh se ha convertido en una estrategia nueva y de la mayor importancia para la erradicación de la pobreza.